



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Technical 잠수기술과 소형 플랫폼을 이용한 해난구조 활동 효율성 제고 방안 연구

A study on the improvement of ROK Navy salvage and rescue
activity using technical diving technique and a small platform



지도교수 강 신 영

2012년 12월 4일

한국해양대학교 해양관리기술대학원

수중잠수과학기술 전공

김 태 현

本 論文을 김태현의
工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 강 효 진 인
위 원 김 용 환 인
위 원 강 신 영 인

2012년 12월 4일

한국해양대학교 해양관리기술대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	vi
I. 서 론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구의 범위 및 방법	3
3. 연구의 제한사항	4
II. 이론적 고찰	5
1. 해군 구조 잠수체계 현황	5
2. 테크니컬 잠수체계	7
1) 나이트록스 잠수	8
2) 재호흡기 잠수	10
3. 감압 이론	15
1) 잠수 시 감압 원리	15
2) 미 해군 감압 모델	20
4. 선박에 미치는 외력	22
III. 해군 구조 잠수체계 제한사항	26
1. 압축 공기 관련된 제한사항	26
1) 질소 마취	26
2) 산소 독성	27
3) 고탄산혈증	29

4) 불활성 기체 축적과 배출 관련 제한사항	30
2. 함위 유지와 관련된 제한사항	30
IV. 해군 구조 잠수체계 개선방안	33
1. 테크니컬 잠수체계 적용	33
1) 테크니컬 잠수와 개방회로 공기 잠수체계 간 비교분석	33
(1) 가용 잠수심도	33
(2) 무감압 한계시간	35
(3) 수중 체류 가능시간	38
(4) 감압의 효율성	43
2) 테크니컬 잠수체계 적용 방안	53
2. 소형 플랫폼과 portable 잠수체계 적용	60
1) 구조함과 소형 플랫폼 간 외력 비교	60
(1) 풍압력 비교	60
(2) 유압력 비교	65
2) 소형 플랫폼과 portable 잠수체계 적용 방안	67
V. 결론 및 논의	75
참 고 문 헌	77

표 목차

표 1. 나이트록스 산소 비율별 분압표	9
표 2. 조직 포화 단계	16
표 3. Haldane과 Workman의 과포화 임계비율	18
표 4. 중추신경계 산소 독성의 증상	29
표 5. 잠수함구조함 함위 유지 가능성 판단	32
표 6. 각 잠수체계별 가용 잠수심도 비교	34
표 7. 잠수 수심별 각 잠수체계의 무감압 하 최대 체류 가능시간	36
표 8. NAVSEA 군사표준(MIL-STD) steel 72형 실린더 정보	39
표 9. 수심과 수온에 따른 각 잠수체계별 호흡기체 지속시간 비교	41
표 10. 미 해군 폐쇄회로 재호흡기의 수온에 따른 여과제 성능 지속시간	43
표 11. 수심-해저체류시간별 각 잠수체계 감압시간 비교	45
표 12. 해군 구조부대와 민간 테크니컬 잠수 교육단체 교육과정 비교	54
표 13. 구조함과 소형 플랫폼(바지선) 관련 수치	60
표 14. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 10 kts)	62
표 15. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 20 kts)	62
표 16. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 30 kts)	63
표 17. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 10 kts)	63
표 18. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 20 kts)	64
표 19. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 30 kts)	64
표 20. 유속에 따라 해군 구조함이 받는 유압력	66
표 21. 유속에 따라 소형 플랫폼이 받는 유압력	66
표 22. 해군에서 파악 중인 주요 민간 구조자산 현황	68
표 23. MDS 제원	72

그림 목차

그림 1. 3묘박 및 4묘박을 이용한 함위 유지 방법	6
그림 2. 자동함위유지장치를 이용한 함위 유지 방법	7
그림 3. 조직구획 반감시간 도식화	17
그림 4. EE 모델과 EL 모델 비교	22
그림 5. 각 잠수체계별 가용 잠수심도 비교	35
그림 6. 잠수 수심별 각 잠수체계의 무감압 하 최대 체류 가능시간	37
그림 7. 활동 수준에 따른 RMV	38
그림 8. 수심과 수온에 따른 각 잠수체계별 호흡기체 지속시간 비교	42
그림 9. 100 ft 잠수 시 감압시간 비교	47
그림 10. 110 ft 잠수 시 감압시간 비교	47
그림 11. 120 ft 잠수 시 감압시간 비교	48
그림 12. 130 ft 잠수 시 감압시간 비교	48
그림 13. 140 ft 잠수 시 감압시간 비교	49
그림 14. 150 ft 잠수 시 감압시간 비교	49
그림 16. 160 ft 잠수 시 감압시간 비교	50
그림 16. 170 ft 잠수 시 감압시간 비교	50
그림 17. 180 ft 잠수 시 감압시간 비교	51
그림 18. 190 ft 잠수 시 감압시간 비교	51
그림 19. 호흡량의 위치에 따른 잠수사의 호흡저항	56
그림 20. 미 해군 MK-16 재호흡기	57
그림 21. 테크니컬 잠수체계 도입을 통해 증대 가능한 심해잠수 효율성 도식화	59
그림 22. 해군 구조함 풍압 투영면적	61
그림 23. 소형 플랫폼 풍압 투영면적	61
그림 24. 해군 구조함과 소형 플랫폼의 풍압력 비교 그래프	65
그림 25. 해군 구조함과 소형 플랫폼의 유압력 비교 그래프	66

그림 26. 민·관·군 탐색/구조자산 통합 활용 절차도	70
그림 27. MDS 주요 구성품	72
그림 28. MDS 소형 플랫폼 적용 시 변화되어야 할 구조작전 절차(안)	74



A study on the improvement of ROK Navy salvage and rescue activity using technical diving technique and a small platform

Kim, Tae-hyun

Underwater Diving Science and Technology
Graduate School of
Korea Maritime University

Abstract

This study suggests the improvement of ROK Navy salvage and rescue diving system. ROK Navy experiences characteristic restrictions for the environmental loading. These restrictions are known to deteriorate the efficiency of Navy salvage and rescue diving activity. In this study, the measurements were suggested to improve the efficiency. To achieve the goal, a comprehensive analysis is conducted for the current Navy system.

As a result, two suggestions were made; First, the technical diving technique such as nitrox and rebreather diving must be introduced to Navy for the improvement of current diving technique which is open circuit SCUBA system. By adopting that technique, decompression procedures and underwater operation can be improved dramatically. Second, Navy salvage ship has a big projection area to the environmental loading. Consequently, the ship experiences rather big drag forces due to strong wind and current which hamper the stabilization of ship positioning at sea. Therefore, a diving platform such as barge with mobile diving system should be introduced to ROK Navy.

These suggestions can be utilized to improve ROK Navy salvage and

rescue activity.

Key words; technical diving, Navy, wind and current pressure force,
diving platform, mobile diving system



I. 서 론

1. 연구의 필요성 및 목적

해난구조는 ‘바다에서 위험한 상태에 처한 물체 또는 인원을 위험으로부터 구원하는 행위’를 의미한다. 해난구조 활동은 기초조사에서부터 탐색, 각종 구난 활동 등 대부분의 행위가 해중(海中)에서 실시되므로 해난구조 연구에 있어 잠수체계에 대한 정확한 분석과 그에 따른 개선사항 도출은 기본적인면서도 대단히 중요한 요소라 할 수 있다.

구조 잠수체계는 해난구조를 목적으로 하는 잠수에 필요한 장비 및 시설, 조직 등을 의미하는 것으로 본 연구에서는 잠수 장비와 잠수에 필요한 시설 등을 뜻한다. 따라서 구조 잠수체계는 수중에서 운용되는 장비 외에도 해상에서 플랫폼의 역할을 수행하는 모함(母艦)까지를 포함하는 포괄적 개념으로 정의할 수 있다. 해군의 구조 잠수체계는 개방회로 공기 스쿠버 및 표면공급 잠수체계로 분류된다. 스쿠버(SCUBA)는 Self Contained Underwater Breathing Apparatus의 약어로 잠수사가 압축된 호흡기체 저장 용기(用器)를 착용하고 수중 활동을 할 수 있도록 고안된 잠수 장비를 총칭한다. 개방회로 공기 스쿠버는 공기를 호흡기체로 사용하며 호흡한 기체를 외부로 배출한다. 스쿠버 잠수 장비는 실린더 및 레귤레이터 등 간편하고 경량화 되어 있고 수중 기동성이 우수하여 수중탐색과 경량 작업의 목적으로 사용한다. 표면공급 잠수체계(SSDS)는 Surface Supplied Diving System의 약어로 스쿠버와 달리 잠수모함 혹은 육상의 호흡기체 저장용기로부터 호흡기체 이송이 가능한 호스(umbilical)가 잠수사의 잠수헬멧에 연결되어 있고, 호흡한 기체를 모두 배출하는 개방회로 방식이다. 호흡기체의 종류에 따라서는 공기와 혼합기체(헬륨과 산소의 혼합) 잠수로 분류할 수 있다. 잠수모함에는 호흡기체 저장용기, 호흡기체 조절 통제장치, 감압 챔버(chamber), 잠수사 이송용 소형 크레인 등이 장착되어 있다. 해군은 구조함을 잠수모함으로 운용한다. 해군 구조함은 잠수를 지원하는 모함의 역할

외에도 중량물 인양작업과 좌초선 이초, 예인, 함정화재 시 소화지원 등의 다양한 해난구조 임무를 수행할 수 있도록 설계되어 있어 일반적인 민간 잠수모선에 비해 그 체적이 큰 편이다. 표면공급 잠수체계 운용을 위해서는 잠수모함 역할을 수행하는 구조함이 3점 또는 4점 묘박을 하여 고정된 위치에서 잠수사를 지원해야 하는데, 큰 조석간만의 차와 강한 조류 등 한국 근해 해역의 특성상 체적이 큰 해군 구조함의 함위 유지는 매우 어려운 도전이다(강, 2010).

각 구조 잠수체계는 운용상에 있어 환경적 외력 및 고압에 따른 생리적 부작용 등으로 인해 고유의 제한사항을 가진다. 불량한 환경 조건은 구조함의 함위(艦位) 유지를 어렵게 만들어 표면공급 잠수체계 운용의 안전성과 신뢰성을 저하시킨다. 2010년 천안함 구조작전 시 함미 선체가 위치하던 수심은 개방회로 공기 스쿠버로 잠수할 수 있는 한계수심인 130 ft를 초과하였기에 현장에서 안전을 고려하여 잠수하기에는 많은 제약이 있었다. 이 수심에서는 잠수모함의 역할을 수행하는 구조함이 3점 또는 4점 묘박을 한 상태에서 운용할 수 있는 표면공급 잠수체계를 사용하는 것이 안전한 방법이었으나, 당 해역(서해 백령도 근해)의 강한 조류로 인해 구조함의 함위를 유지하는 것은 불가능하였다. 따라서 제한된 짧은 시간만 잠수 가능한 개방회로 공기 스쿠버 잠수체계를 사용할 수밖에 없었다(해군본부, 2010). 그러나 이후 선체 인양단계에서 민간 구조업체는 소형 바지선(barge)을 잠수모함으로 운용하여 표면공급 잠수를 수행하였다. 이는 해군과 민간 잠수사 간의 역량이나 특정 잠수체계의 우수성에서 기인한 것이 아니라, 해군 구조함에 비해 바지선이 소형이었으며 장착된 상부 구조물이 적었기 때문이다. 선박이 해상에서 받는 외력은 풍압력, 표류력, 유압력으로 대표되는데, 이 힘은 선박이 외력을 받는 면적에 비례한다. 따라서 소형 바지선은 해군 구조함에 비해 표면공급 잠수를 원활하게 수행할 수 있는 전제조건인 함위 유지에 대한 안정성을 확보할 수 있었다. 이러한 점을 비추어 볼 때 해군 역시 함위 유지에 대한 안정성 확보를 위해 소형 바지선과 같은 소형 플랫폼을 잠수모함으로 운용하고, 그에 따라 모듈화 되고 이동이 간편한(portable) 표면공급 잠수체계를 운용할 필요성이 제기된다.

기동성과 신속성을 장점으로 하는 개방회로 공기 스쿠버는 수중 목표물 탐색

및 정보 수집 등 수중 해난구조 활동에 대단히 유용한 잠수체계이다. 그러나 한정된 호흡기체량과 압력 하 압축 공기의 제한사항 등으로 인해 수중체류시간과 잠수 수심에 제약을 받는다. 이를 극복하기 위해 일부 민간 잠수계에서는 스쿠버 형식을 사용하되, 호흡기체의 성분(fraction) 조절과 폐쇄회로 내에서 호흡기체를 재순환시키는 등의 방식을 통해 무감압 한계시간, 잠수심도 및 기체 운용 효율성의 증대를 추구하는 ‘테크니컬 잠수(technical diving)체계’를 운용 중이다. 해군 역시, 테크니컬 잠수체계의 적용을 통해 개방회로 공기 스쿠버의 한계를 개선할 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 해군 구조 잠수체계인 표면공급 잠수와 개방회로 공기 스쿠버의 제한사항을 개선하기 위해 함위 유지에 대한 안정성 확보와 테크니컬 잠수체계 적용 등의 방안을 제시하여 해군 해난구조 활동 효율성 향상에 도움이 되는 기초자료를 제공하기 위함이다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 해군 구조 잠수체계를 분석, 제한사항을 도출하고 그에 따른 개선 방안을 제시하기 위해 해군의 모든 잠수체계를 연구한 것은 아니며, 해난구조에 활용되는 구조 잠수체계만을 대상으로 하였다.

표면공급 잠수체계의 함위 유지 안정성 분석 및 개선을 위한 외력의 산출, 비교·분석에 있어, 해상에서 선박에 영향을 미치는 외력인 풍압력, 유압력, 표류력 중 구조, 잠수 행위에 큰 영향을 미치는 바람과 해수 흐름에 의한 풍압력, 유압력만을 고려하였다. 풍압력과 유압력은 구조함이 가장 큰 항력을 받는 정측면을 기준으로 산출하였다.

개방회로 공기 스쿠버의 제한사항 개선을 위한 테크니컬 잠수체계의 분석에 있어서는 나이트록스와 재호흡기 잠수체계를 대상으로 하였다. 테크니컬 잠수체계를 이론적으로 고찰하고 개방회로 공기 잠수와 나이트록스(nitrox) 잠수, 재호흡기(rebreather) 간 가용심도, 무감압 한계시간, 수중 체류 가능시간, 감압의 효율성 등을 비교·분석하였다. 테크니컬 잠수체계 중 트라이믹스(trimix) 잠수는

하잠, 해저, 감압 등의 기체 구분으로 인해 호흡기체 실린더의 개수 및 체적이 증가되므로 스쿠버 고유의 기동성, 간편성보다는 실험적인 측면이 부각되어 본 연구에서는 제외하였다.

3. 연구의 제한사항

본 논문은 해군의 해난구조 활동 효율성에 관한 연구이다. 현재 해군에는 본 논문과 관련된 선행연구 결과가 없었으며, 해군의 해난구조 활동은 민간의 해난구조 활동과 그 목적과 형태가 상이하여 학계나 산업계에서도 관련 선행연구 결과를 찾을 수 없었다. 테크니컬 잠수 또는 선박에 미치는 외력에 대한 이론적 고찰이나 단편의 논문은 있었으나 이를 해군 해난구조 활동에 접목시키기 위한 연구 자료나 결과가 없었으므로, 연구를 진행함에 있어서 개괄적이고 단편적인 자료를 참고하여 세부 연구를 진행해야 하는 등의 제한점이 있었다.



II. 이론적 고찰

1. 해군 구조 잠수체계 현황

해군에서 운용중인 구조 잠수체계는 개방회로 공기 스쿠버와 표면공급 잠수체계로 분류할 수 있다.

개방회로 공기 스쿠버는 수중 기동성이 우수하여 수중탐색과 경량 작업의 목적으로 사용한다. 개방회로 공기 스쿠버는 공기 고유의 고압 하 부정적 생리현상으로 인해 수심 약 40 m까지 운용심도를 제한하고 있으며, 한정된 호흡기체의 양으로 인해 장시간 수중에 체류할 수 없다. 또한, 구조 잠수체계의 범주에는 포함되지 않지만 해군에서 사용 중인 폐쇄회로 스쿠버는 100% 순수 산소를 호흡기체로 사용하며, 사용된 산소는 필터를 통해 이산화탄소를 제거한 후 장비 내에서 재순환시키는 방식으로, 개방회로 스쿠버와 달리 수면에 기포가 생기지 않는 이점이 있어 주로 해중 침투 등의 용도로 사용하고 있다. 폐쇄회로 스쿠버는 7 m 이상 수심에서 잠수할 경우 수중 체류시간 증가 시 중추신경계 산소 독성을 유발할 수 있다(해군작전사령부, 2005).

표면공급 잠수체계는 스쿠버와 달리 함상(艦上)의 호흡기체 저장용기로부터 호흡기체를 이송할 수 있는 엄빌리컬이 잠수헬멧에 연결되어 있고 호흡한 기체를 모두 배출하는 개방회로 방식이며, 호흡기체의 지속적인 공급이 가능하고 모함으로부터의 철저한 안전관리로 인해 수중 중작업에 주로 이용한다. 호흡기체의 종류에 따라 공기와 혼합기체 잠수로 구분된다. 표면공급 공기 잠수는 압축된 일반 공기(약 21%의 산소와 79% 질소 비율)를 호흡기체로 이용하고, 표면공급 혼합기체 잠수는 헬륨과 산소의 혼합물인 헬리옥스(heliox)를 이용한다. 잠수 중 압축된 일반 공기를 호흡하면 독성, 불활성 기체의 마취, 신체 조직 내 축적으로 인한 감압의 어려움 등 여러 가지 생리적 제한사항이 발생한다. 이러한 제한사항을 극복하기 위해서 고안한 것이 헬리옥스 잠수와 같은 혼합기체

잠수이다. 헬륨은 질소에 비해 마취효과가 약 1/4 정도로 미약하며 고압 하 산소분압의 증대를 예방하기 위해 하잠, 해저, 감압 기체 등으로 분류하여 산소의 비율을 조절하여 잠수를 수행하고 있다.

어떠한 호흡기체를 운용하든지 간에 표면공급 잠수를 위해서는 잠수모함(잠수모함)이 필요하다. 잠수모함에는 호흡기체 저장용기, 호흡기체 조절·통제 장치, 감압 챔버(chamber), 잠수사 이송용 소형 크레인, 모함의 함위 유지를 위한 묘박용 닻(anchor), 체인, 자동함위유지장치(DPS, Dynamic Positioning System) 등이 장착되어 있다. 해군은 수상함구조함(ATS, Auxiliary Towing Ship)과 잠수함구조함(ASR, Auxiliary Submarine Rescue ship)을 잠수모함으로 운용한다. 구조함은 함위 유지를 위해 3묘박과 4묘박, 그리고 자동함위유지장치를 이용한다. 수상함구조함에서는 앵커를 투하, 함정과 연결하는 3묘박/4묘박 방식을, 잠수함구조함은 100 m 이내의 수심에서는 4묘박을, 100 m 이상의 대심도에서는 자동함위유지장치를 운용하여 함위를 유지한다(해군본부, 2010).

<그림 1>과 <그림 2>는 각각 3묘박/4묘박과 자동함위유지장치를 이용한 함위 유지 방법이다.

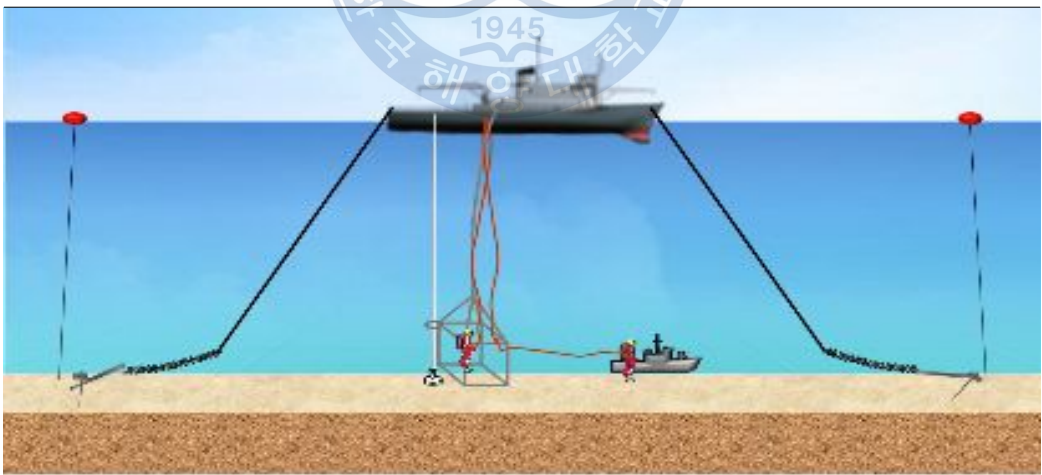


그림 1. 3묘박 및 4묘박을 이용한 함위 유지 방법

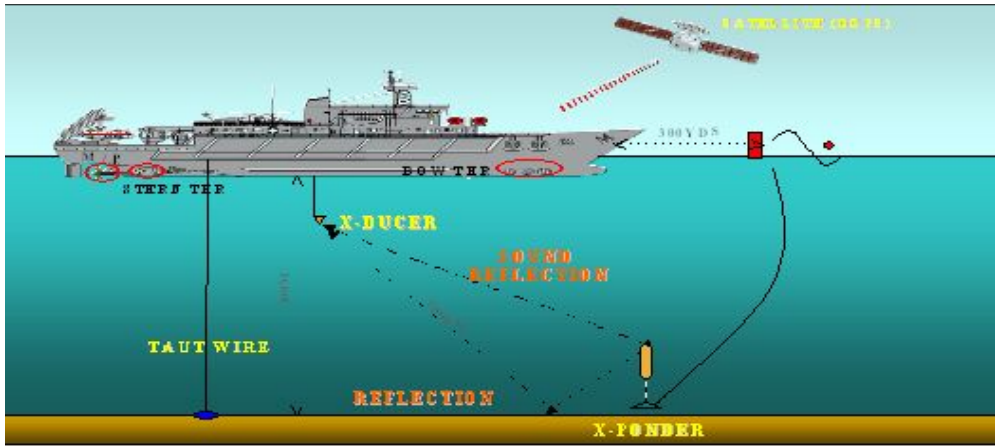


그림 2. 자동함위유지장치를 이용한 함위 유지 방법

구조함은 잠수를 지원하는 모함의 역할 외에도 대형롤러와 유압권양기(HCP, Hydraulic Cable Puller), 4쌍활차 등을 이용한 중량물 인양작업과 좌초선 이초, 예인, 함정화재 시 소화지원 등의 다양한 해난구조 임무를 수행할 수 있다(해군 작전사령부, 2001).

2. 테크니컬 잠수체계

‘테크니컬 잠수’라는 용어는 1985년 Nitrox 교육단체(IAND, International Association of Nitrox Divers)를 설립한 Dick Rutkowski가 1991년 ‘Aquacorp’란 잡지에서 최초로 ‘Technical diving’이라는 표현을 쓰면서부터 사용되기 시작했다. 90년대 후반부터 ‘테크니컬 잠수’라는 용어가 본격적으로 사용되었으나 아직까지 정확한 개념적, 사전적 정의는 확립되어 있지 않다. 또한, 정확히 어떤 것을 의미하는지에 대한 논의 역시 활발히 진전되지 않고 세계의 각 잠수교육 협회별로 조금씩 상이한 정의를 내리고 있으며, 그 범주 역시 논란의 여지가 되고 있다. 관련 문헌 조사 결과, 광의의 테크니컬 잠수는 ‘특수한 장비와 진보된 기술을 사용하여 광범위하고 다양한 수심으로 잠수하여 일반 공기 잠수로는 할 수 없는 특별한 과제를 수행하는 잠수’를 지칭하는 것이며, 종래의 레

저 잠수보다 위험성이 높은 모든 스쿠버 잠수 형태를 의미하기도 한다(IANTD, 2012). 미국의 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)은 테크니컬 잠수를 레저 잠수와 비교하여 구체적으로 '레저 스쿠버 잠수의 체류시간과 수심을 초과하는 모든 잠수를 의미하며, 일반적으로 특수한 혼합기체를 사용하며 이 혼합기체는 계획된 수심과 수중 체류시간에 따라 결정된다. 일반적인 공기 스쿠버 잠수 한계가 130 ft인 반면, 테크니컬 잠수의 허용범위는 170에서 350 ft까지이며 때로는 더욱 깊은 수심까지도 잠수가 가능하다. 또한 상승 중 적어도 한번 이상 기체 교환을 통해 감압을 수행한다.'고 정의하고 있다(NOAA, 2002). 또한 PADI는 '기존의 산업 및 레저 잠수보다 더 깊은 한계 수심을 갖는 잠수로서 130 ft 이상의 극한환경, 감압기체를 이용한 감압행위, 단일 잠수에 다양한 혼합기체를 사용하는 잠수 중 하나 또는 그 이상의 조건을 포함하는 잠수를 의미한다.'고 정의하고 있다(PADI, 2012).

상기 테크니컬 잠수의 정의를 종합해 보면 "공기가 아닌 특수한 혼합기체의 호흡과 수중 기술을 통해 활동수심과 체류시간을 증대시키는 스쿠버 형태의 잠수"로 개념적 정의를 내릴 수 있다.

1) 나이트록스 잠수

나이트록스는 Nitrogen과 Oxygen의 합성어로서 질소와 산소의 일체의 혼합물을 의미한다. 잠수의 측면에서는 일반 공기(약 21%의 산소와 79%의 질소로 구성)의 구성 비율을 조절하여 사용하는 호흡기체를 총칭하며, 일반 공기에 비해 산소 비율이 풍부한 혼합기체라고 지칭할 수 있다. 일반 공기는 즉시 준비 가능하고 경제적인 면에서 저렴한 호흡기체이다. 하지만 일정 수심 하에서의 질소 마취와 불활성 기체인 질소로 인한 감압의 부담 등의 문제점으로 인해 이상적인 기체가 아니다(Wells & Phoel, 1995). 잠수 시 하잠에 따른 압력의 증가는 질소 분압을 상승시켜 마취효과를 유발한다. 또한, 신체 조직구획에 용해되어 축적되는 질소의 양 역시 질소의 분압에 의해 결정되고 그에 따라 감압 시간의 증감이 결정된다. 따라서 이러한 일반 공기 호흡의 부정적인 영향을 극복

하기 위한 가장 기본적이고 최선의 방법은 질소의 비율을 줄이고 산소의 비율을 증가시키는 것이다. 이러한 이론적 배경을 토대로 고안된 잠수가 바로 나이트록스 잠수이다. 나이트록스 잠수는 일반 공기의 비율과 다른 모든 산소와 질소의 혼합기체를 의미하나, 불활성 기체의 고압 하 부작용을 극복하기 위해 산소 비율이 21%보다 더 높은 기체를 주로 운용한다. 그 중 32%와 36% 기체는 질소 마취와 산소 독성의 부작용을 방지하는 동시에, 가장 효율성이 큰 기체이다. 일반 공기보다 높은 산소 비율을 가지는 나이트록스는 중추신경계 산소 독성을 유발하는 산소분압인 1.6 ata를 기준으로 가용 수심을 결정한다. 따라서 32% 나이트록스는 최대 가용 수심은 130 ft이며 36% 나이트록스는 110 ft이다. <표 1>은 나이트록스 산소 비율별 분압표이며, 음영 부분 위쪽의 산소분압에 해당하는 수심이 각 비율별 기체의 최대 가용 수심을 의미한다.

표 1. 나이트록스 산소 비율별 분압표 (단위: ata)

수심(ft)	21%	28%	30%	31%	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%	39%	40%
0	0.21	0.28	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40
35	0.43	0.57	0.62	0.66	0.66	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82
40	0.46	0.62	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88
50	0.53	0.71	0.76	0.78	0.81	0.83	0.86	0.88	0.91	0.93	0.96	0.98	1.01
60	0.59	0.79	0.85	0.87	0.90	0.93	0.96	0.99	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13
70	0.66	0.87	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.19	1.22	1.25
80	0.72	0.96	1.03	1.06	1.09	1.13	1.16	1.20	1.23	1.27	1.30	1.33	1.37
90	0.78	1.04	1.12	1.16	1.19	1.23	1.27	1.31	1.34	1.38	1.42	1.45	1.49
100	0.85	1.13	1.21	1.25	1.29	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57	1.61
110	0.91	1.21	1.30	1.34	1.39	1.43	1.47	1.52	1.56	1.60	1.65	1.69	1.73
120	0.97	1.30	1.39	1.44	1.48	1.43	1.58	1.62	1.67	1.72	1.76	1.81	1.86
130	1.04	1.38	1.48	1.53	1.58	1.63	1.68	1.73	1.78	1.83	1.88	1.93	1.98
140	1.10	1.47	1.57	1.62	1.68	1.73	1.78	1.83	1.89	1.94	1.99		
150	1.17	1.55	1.67	1.72	1.78	1.83	1.89	1.94	2.00				
160	1.23	1.64	1.76	1.81	1.87	1.93	1.99						
170	1.29	1.72	1.85	1.91	1.97								

이처럼 산소 비율이 풍부한 호흡기체는 질소 함량을 감소시키므로 ‘마취효과 감소 및 무감압 시간의 증대, 감압병 예방’이라는 장점 이면에 산소의 함량을 증가시키므로 ‘산소 독성 발생 가능성 증가’라는 동전의 양면과 같은 결과를 초래한다. 산소 독성의 측면만을 보자면, 오히려 기존의 공기 스쿠버 잠수에 비해 더 낮은 한계 수심을 가진다. 따라서 나이트록스 잠수는 대심도의 심해잠수를 위해 고안된 것은 아니며, 기존 공기 스쿠버 한계 수심 내에서 장점을 극대화하기 위한 것이다.

나이트록스 잠수에서는 등가 공기 수심(Equivalent Air Depth)을 이용하여 기준 수심을 설정한다(NOAA, 2002). 등가 공기 수심은 실제 잠수 수심이 아니라 호흡기체 내 질소의 분압을 기반으로 측정된 수심이다. 즉, 질소 분압을 기준으로 나이트록스와 일반 공기 잠수의 수심이 동일하게 되는 수심을 의미한다. 이는 고(高)산소의 나이트록스 기체가 일반 공기 잠수에 비해 획득할 수 있는 안전 인자(safety factor)를 나타내는 지수이기도 하다. 수심 42 ft에서 일반 공기의 질소 분압과 60 ft에서 나이트록스 36:64 기체의 질소 분압은 1.8 ata로 동일하다. 즉, 이 나이트록스 기체를 이용한 60 ft 잠수에서의 등가 공기 수심은 42 ft이다. 또한 36% 산소 함량의 나이트록스 기체를 이용한 잠수는 일반 압축 공기 42 ft 잠수와 동일한 신체적 효과(질소 마취 발병, 신체 용해 질소량 등)를 가지며 감압 역시 해당 등가 공기 수심에 따라 수행된다. 따라서 획득 가능한 안전 인자는 18 ft이다.

2) 재호흡기 잠수

재호흡기는 잠수사가 호흡한 기체를 폐쇄회로 내에서 순환시켜 다시 호흡할 수 있도록 고안된 잠수체계를 통칭한다(Barsky et al., 1998). 재호흡이 가능하기 위해서는 호흡기체가 외부로 배출되어서는 안 된다. 잠수 중 호흡을 하면 산소가 신체 조직 내에서 신진대사 작용을 하고 자연적으로 그 만큼의 이산화탄소가 발생하게 된다. 이산화탄소는 인체의 호흡 욕구를 자극하므로 일정량은 반드시 필요하나, 과다 시에는 신체에 치명적인 부작용을 초래한다. 개방회로 잠

수에서는 매 호흡마다 이산화탄소를 체외로 배출하므로 고(高)탄산으로 인한 부작용은 낮은 편이지만, 재호흡기는 호흡기체가 외부로 배출되지 않기 때문에 이산화탄소의 제거 문제는 대단히 중요하다. 미 해군은 회로 내에서 순환되는 기체를 호흡하는 재호흡기에서 화학적 물질을 이용하여 이산화탄소를 0.5% 수면등가 이하로 여과 가능토록 설계기준을 규정하고 있다(USN, 2001). 수면등가는 과거의 실험치와 새로운 고압 환경 간의 전환을 위한 단위이다. 역사적으로 볼 때, 모든 측정은 대기압 상태인 수면 위에서 실시되었다. 모든 결과들은 퍼센트로 제공되었는데, 그 이유는 편리하고 절대값으로 환산하기 쉬웠기 때문이다. 그러나 생리학, 물리학, 화학에서는 거의 퍼센트를 사용하지 않고 특히 기체를 취급할 때는 대부분 부분압을 사용한다. 따라서 수면등가는 해당 부분압이 지배하는 환경에서의 수치를 수면 상에서의 수치로 전환하기 위한 것이다. 즉, 수면등가 0.5%는 수면에서의 이산화탄소 비율이 0.5%일 때의 부분압을 의미한다(Mount et al., 2010).

이렇게 여과된 기체를 잠수사가 다시 호흡함에 따라 기체는 외부로 배출되지 않게 된다. 또한 신진대사로 인해 소모된 산소의 양만큼 보충하여 추가한다. 즉, 일정량의 산소를 호흡하고 그에 따라 발생하는 이산화탄소를 제거하여 다시 호흡하는 방식이다. 이는 호흡기체의 효율성을 극대화시킨다. 이러한 매커니즘을 전제로 고안된 잠수체계가 재호흡기이다. 따라서 재호흡기를 광의의 차원에서 폐쇄회로 잠수 장비라고도 할 수 있다.

재호흡기는 완전 폐쇄회로와 반폐쇄회로 방식으로 구분되며, 또한 운용기체에 따라 산소와 혼합기체 재호흡기로 구분할 수 있다(Barsky et al., 1998). 완전 폐쇄회로 산소 재호흡기는 호흡기체로 100% 산소를 운용하므로 산소 독성의 위험성으로 인해 최대 7.6 m 수심 이상의 잠수가 불가하다. 순수 산소를 이용하기 때문에 매우 위험하며 주로 군사적 목적의 은밀 침투용 장비로 활용된다(해군작전사령부, 2005).

완전 폐쇄회로 혼합기체 재호흡기는 산소와 희석기체(질소 또는 헬륨)의 혼합이 전자식으로 제어된다. 수심이 깊어지면 산소의 비율을 줄이고 희석기체의 비율을 증가시킨다. 또한 수심이 낮아지면 산소의 비율을 증가시키고 희석기체

의 비율을 줄여 잠수 중 적절한 산소분압(1.6 ata 이하)을 유지하므로 대단히 깊은 수심으로 잠수가 가능하며 감압의 부담을 크게 감소시킨다. 또한, 회로 내에서 호흡기체가 순환하므로 개방회로에 비해 기체의 효율성이 대단히 우수하다. 일반적인 개방회로 잠수 시스템의 경우 흡입한 기체를 구성하는 산소 중 일부만 신체에서 활용하고 나머지는 기포의 형태로 배출되어 장비 외부로 버려진다. 이는 기체 효율성을 크게 저하시키는 원인이 된다. 잠수 수심이 깊어질수록 개방회로 잠수 장비의 비효율성은 증가된다. 깊은 수심의 높은 압력은 호흡 배출 시 더 많은 기체 분자를 방출시키기 때문이다. 반면에, 재호흡기는 호흡으로 배출되는 대부분의 기체를 회로 내에서 순환시켜 다시 사용한다. 따라서 기포의 형태로 배출되는 기체가 거의 없을 뿐 아니라, 더 깊은 수심에서도 기체 사용 효율에는 변화가 없다. 이러한 특징으로 인해 재호흡기를 이용하여 깊게 잠수할수록 기체 효율적인 면에서는 상대적으로 더 큰 이점을 가지게 된다. 하지만 장비의 다수가 전자적 시스템으로 구성되어 있어 잠수 전 치밀한 점검과 평소 관리가 반드시 수반되어야 한다.

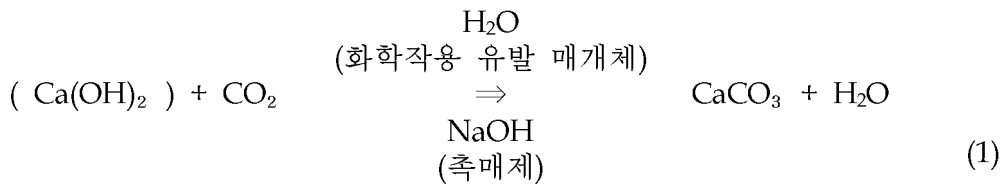
반폐쇄회로 혼합기체 재호흡기는 사전에 혼합비율이 정해진 기체를 사용하며 전자식이 아닌 기계식으로 설계되어 잠수 중에 기체 비율을 조절하지 못한다. 실린더로부터 일정량의 기체가 지속적으로 호흡낭(counter lung)으로 흘러 들어오며 일정한 소량의 부피가 규칙적으로 외부로 빠져나가므로 기체가 모두 재순환되지는 않는다. 산소와 희석기체가 아닌 일정 비율의 나이트록스 기체를 운용하므로 깊은 수심으로의 잠수가 불가능하다.

완전 폐쇄회로 혼합기체 재호흡기는 크게 흡·배기호스, 호흡낭, 이산화탄소 여과(CO₂ Scrubber) 시스템, 산소 및 희석기체(diluent gas) 공급 시스템, 산소 분석 및 전자적 제어 시스템으로 구성되어 있다.

흡·배기호스는 잠수사가 호흡기체를 흡입하고 배출하는 호스이며 공기 스쿠버의 압축 공기 레귤레이터와는 다르게 넓은 용적과 주름관식 형태를 가진다. 호스의 직경이 크고 내부가 유연할수록 호흡저항은 적어진다. 또한 주름관식으로 되어 있는 호스의 형태는 호흡으로 인해 발생하는 수분들을 단계적으로 흡수하여 장비 내에 수분이 과다하게 발생하는 것을 방지한다.

호흡낭은 평균적인 인체의 폐 용량과 유사한 용적을 가지는 기체낭으로서 호흡한 기체가 머무는 장소이다. 인체의 총 폐용량(TLC, Total Lung Capacity)은 최대한 들이마서 폐 안에 공기로 가득 채울 수 있는 공기의 양을 말하고 정상인의 경우 약 5-6리터 정도이다. 약 5-7리터 정도의 기체를 보관할 수 있는 호흡낭은 회로 내에서 순환되는 기체를 저장하여 폐의 흡기 압력을 통해 육상에서 호흡하는 것처럼 흡·배기를 가능하게 한다. 시스템 내부를 순환하는 기체의 움직임은 잠수사가 폐를 통해서 내쉬고 들이쉬는 자연스러운 힘에 의해서 일어난다. 폐는 아주 작은 압력차를 발생시키기 때문에 회로 역시 최소한의 공기 흐름이 가능하도록 설계되며 매우 적은 호흡저항으로 운용된다. 호흡낭이 없으면 재호흡기 내에서 호흡 사이클은 불가능하다. 배기 기체가 머무르면서 폐의 미세한 압력차로 인해 흡기를 가능하게 해주므로 개방형 스쿠버와 비교 시 호흡저항이 대단히 낮다. 이는 호흡낭의 장착 위치에 따라 각기 다른 호흡저항을 나타내는데 크게 세 가지 위치(등 뒤, 가슴 아래, 뒤쪽 어깨)로 분류되어 장착된다. 가령, 잠수사가 해저를 바라보고 있고 호흡낭이 등 뒤에 위치한 경우 폐의 압력보다 호흡낭의 압력이 낮으므로 흡기에 대한 저항은 높아지고 배기에 대한 저항은 낮아진다(Barsky et al., 1998).

이산화탄소 여과 시스템은 배기로 인한 이산화탄소를 화학적으로 여과시키는 화학물질과 이를 적재하는 여과통(canister)로 분류할 수 있다. 이산화탄소를 여과하는 화학물질에는 소다라임(sodalime)을 주로 사용한다. 소다라임은 대부분의 재호흡기 잠수에 적용하는 화학물질로서 4% 이하의 수산화나트륨(NaOH)과 1% 이하의 수산화칼륨(KOH), 약 80% 정도의 수산화칼슘(Ca(OH)_2), 1% 이하의 결합제 실리카(silica)로 구성되어 있다. 잠수사가 내쉬는 배기가 소다라임을 통과 시 물을 매개체로 하는 촉매적 화학작용에 의해 이산화탄소는 칼슘탄산칼슘(CaCO_3)과 물로 변환되고 변환된 물질은 여과제에 보존된다(Clark et al., 1999). 이산화탄소가 여과되는 화학적 과정은 식(1)과 같다.



산소 및 희석기체 공급 시스템은 일정한 산소분압이 유지될 수 있도록 산소를 보충하고 산소 이외의 여분을 희석기체로 채우기 위해 존재한다. 인체의 신진대사 활동에 사용되는 산소는 약 5% 정도이다. 개방회로 잠수와 달리 회로 내에서 호흡기체가 순환되므로 호흡을 할 때마다 약 5%의 산소가 소모된다. 별도의 산소 추가가 행해지지 않으면 어느 순간에는 산소의 함량이 매우 낮아지게 되고, 산소분압이 0.16 ata 이하가 되면 저산소증이 발현된다. 이를 방지하기 위해 해당 수심에서 저산소증이 발생되지 않도록 산소를 추가하여 산소분압을 일정하게 유지한다. 또한 지속적으로 산소만을 추가하게 되면 산소분압이 상승, 1.6 ata 이상이 되면 산소 독성이 발현된다. 따라서 저산소증과 산소 독성의 발현 한계 사이를 유지할 수 있도록 산소를 희석하는 기체를 혼합해야 한다. 희석기체는 질소와 헬륨, 트라이믹스를 주로 이용한다.

산소 분석 및 전자적 제어 시스템은 저산소증 및 산소 독성을 예방하기 위해 산소 농도를 분석하고 전자적으로 정밀하게 제어하는 역할을 한다. 전자 장치는 산소 센서들로부터 전자적 신호를 받고 조건에 맞게 처리한다. 주 전자장치의 결과는 CPU에 보내진다. 대개 신뢰도를 높이기 위해 세 개의 산소 센서를 사용하는데, 어떤 센서가 고장을 일으키면 CPU의 논리에 의해 고장을 일으킨 센서는 제거되고 가장 근접한 수치를 보여주는 나머지 두 개의 센서 값이 사용된다. 재호흡기 순환 시스템 내부의 산소 농도는 센서에 의해 측정되며, 센서는 전극과 접촉하는 부분에서 일어나는 산소 화학반응을 통하여 발생하는 전기의 세기를 측정한다. 센서는 선택된 산소분압 값으로 설정된다. 센서는 산소분압 값을 실시간으로 감시하여 신호를 전자장치 모듈과 보조 디스플레이로 보낸다. 전자장치 모듈은 센서 신호의 조건을 검사하여 설정된 값과 비교한 다음 산소 공급 밸브를 작동시킨다. 산소분압이 최초 설정된 값보다 낮으면 자동으로 산

소 공급 밸브를 개방하여 산소를 호흡 회로로 보충한다. 산소분압이 설정된 값에 이르면 전자장치는 산소 공급 밸브를 차단하여 산소 공급을 막는다 (Juergensen, 2011).

3. 감압 이론

1) 잠수 시 감압 원리

산소와 달리 신체 내에서 신진대사 작용을 하지 않는 불활성 기체(inert gas)는 그 압력의 증감(增減)에 따라 신체 내에 축적(on-gassing) 및 배출(off-gassing)된다. 잠수와 관련된 대표적인 불활성 기체는 질소이다. 잠수 중 하강 시 주변압은 상승하고, 그에 따라 압력이 높아진 불활성 기체가 폐를 통해 흡입되면 폐와 혈액 간의 기체교환이 일어난다. 기체교환이 일어나기 위해서는 엄청난 넓이의 용적이 필요하고 혈관벽이 아주 얇아야 한다. 이렇게 얇은 벽을 가진 혈관이 모세혈관이며, 인체 각 부분은 모세혈관이 망으로 된 복잡한 망사 모양으로 짜여져 있다. 특히 폐에는 이러한 모세혈관이 아주 얇고 작은 공기 주머니인 폐포를 둘러싸고 있어서 혈액과의 기체 교환이 쉽게 일어날 수 있도록 되어 있다. 폐포와 모세혈관 내 혈액 간의 기체 압력 차이로 인해 기체는 혈액으로 용해(dissolve), 확산(diffuse)되어 신체 각 조직으로 이동한다. 혈액 내의 불활성 기체 압력이 조직 내의 장력보다 높으면 불활성 기체는 혈액에서 조직으로 확산된다. 이러한 과정은 지속적인 혈액 흐름으로 인해 조직 내 불활성 기체 장력이 혈액과 동일하게 될 때까지 계속된다(Powell, 2010). 이처럼 조직의 장력이 불활성 기체의 압력과 동일해져 물리적으로 더 이상의 기체가 용해될 수 없는 상태를 포화(saturation)라고 한다. 이러한 과정은 잠수 중 하강에 따라 주변압이 상승 시 발생된다. 불활성 기체가 질소인 경우 확산을 통한 폐, 혈액, 조직의 순차적인 포화 단계는 <표 2>와 같이 이뤄진다.

표 2. 조직 포화 단계

압력		폐 질소 분압		혈액 질소 분압		조직 질소 분압
하잠	1 bar	0.79 bar	=	0.79 bar	=	0.79 bar
↓	2 bar	1.58 bar	>	0.79 bar	=	0.79 bar
↓	2 bar	1.58 bar	확산	⇨ 1.58 bar	>	0.79 bar
↓	2 bar	1.58 bar	=	1.58 bar	=	1.58 bar

반면, 조직 내 불활성 기체 장력이 혈액의 압력보다 높으면 반대 방향으로 확산된다. 혈액으로 확산된 기체는 혈관을 타고 이동하여 폐포에서 기체 교환을 통해 신체 외부로 배출되며 조직, 혈액, 폐의 압력 차이가 순차적으로 동일해질 때까지 반복되며 이 과정은 조직포화와 반대 방향으로 발생한다. 이는 잠수 중 상승으로 주변압이 하강 시 발생하며 탈포화(desaturation)라고 한다. 조직이 탈포화되는 과정에서는 조직 장력이 호흡기체의 분압이나 주변압보다 더 높아지는 경우가 발생한다. 이러한 상태를 과포화(supersaturation)라고 한다.

전술한 질소 마취, 산소 독성, 고탄산혈증의 연구와 달리 감압 메커니즘은 생리적 실험으로 실측되거나 정확한 증상을 토대로 생성된 것이 아니다. 불활성 기체의 신체 축적 속도는 혈액 흐름률이 클수록 더 빨리 진행되고 배출 속도 역시 혈액의 흐름률에 의해 조절된다는 가설을 기본으로, 신체 조직을 각기 다른 관류량을 기준으로 하여 몇 개의 조직구획들(tissue compartments)로 분류하여 수학적으로 모델링 한 것이다(Haldane et al., 1907). 이렇게 분류된 조직구획은 실제 의학상 신체 조직은 아니며, 수학적 모델링을 위해 설정한 동일한 on, off-gassing 비율을 가진 일종의 구획을 의미한다. 조직구획을 분류하는 기준으로는 방사능 물질의 반감기 개념과 동일한 반감시간(half-time)이 적용된다. Haldane은 조직구획의 반감시간을 5, 10, 20, 40, 75분의 5가지로 분류하였고, 이후 미 해군 NEDU(Navy Experimental Dive Unit)의 Workman(1965)은 깊은 수심에서의 잠수에는 더 느린 조직이 필요하다는 것을 인지하여 5, 10, 20, 40, 80, 120분의 6가지로 분류하는 등 연구자의 가설에 따라 상이하다. 이러한 반감

시간으로 분류된 조직구획은 각 반감시간만큼 해당 압력 포화수준의 50%를 on-gassing한다. 다시 한 번의 반감시간이 경과하면 남아 있는 압력 포화수준의 50%를 축적하는 개념이다. 배출은 그 반대의 과정으로 발생한다. 이러한 조직구획의 포화와 탈포화는 반감시간을 변수로 하는 지수함수(exponential function)의 형태로 나타난다. 어떤 조직구획도 반감시간의 가감에 따라 완벽히 100%로 포화되거나 0%로 감소하지는 않지만 통상 6번의 반감시간이 지나면 포화되거나 완전히 배출되었다고 가정한다. 조직구획의 반감시간은 <그림 3>과 같이 도식화 할 수 있다.

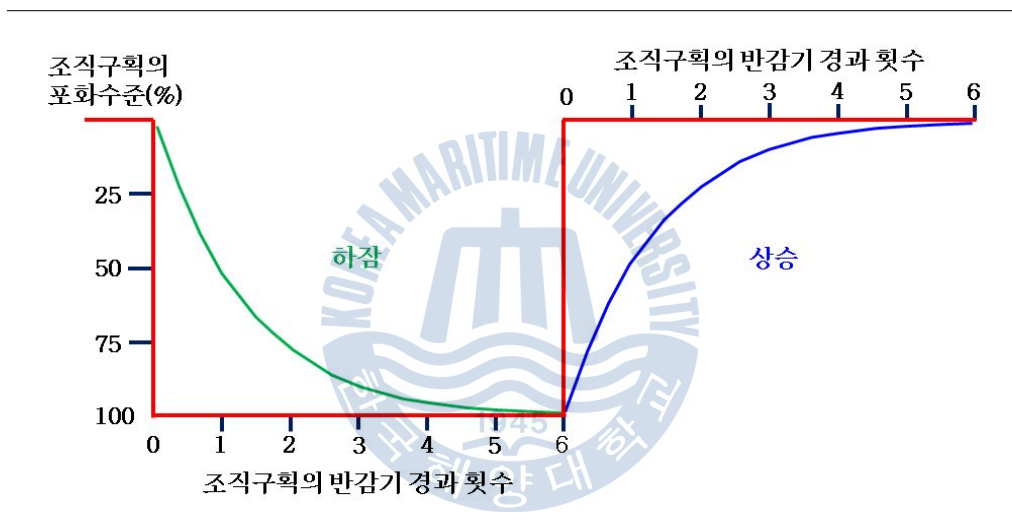
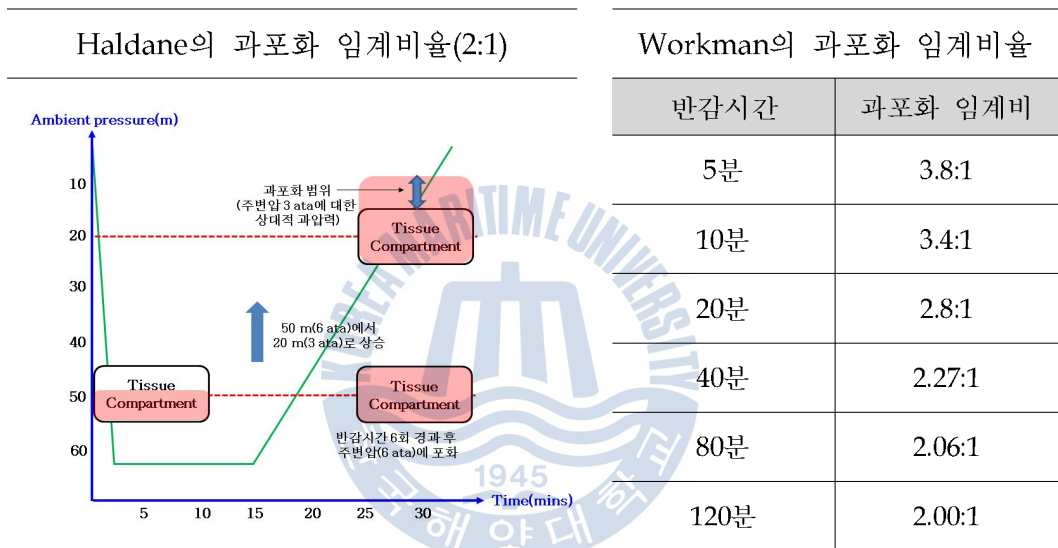


그림 3. 조직구획 반감시간 도식화

반감시간별 조직구획은 상승 중 주변압이 하강함에 따라 주변압에 비해 과포화 상태가 된다. 이에 따른 압력 경사로 조직구획은 off-gassing을 수행한다. Haldane(1907)은 조직구획의 과포화 정도가 주변압에 비해 2배를 넘지 않으면 혈액 내 감압병을 유발하는 기포가 생성되지 않는다고 하였다. 즉, 과포화에 대한 임계비율을 2:1로 정한 것이다. 하지만 이후 미 해군의 Workman(1965)은 공기 중의 질소 비율만을 고려하여 과포화 임계비율을 1.58:1로 수정했으며, 이후 다양한 실험 잠수를 수행하면서 과포화 임계 비율이 모든 조직구획에 동일하게

적용되는 것이 아니며, 각각의 반감시간을 가진 조직구획과 수심(주변압) 사이에 다양하게 존재한다는 것을 인지하였다. 빠른 조직에서는 더 큰 임계비율을 가지며 느린 조직에서는 임계비율이 더 작다. 잠수 활동에 있어서 감압은 임계비율을 초과하지 않고 일정수심에 머무르면서 조직구획의 반감시간에 따라 신체에 용해되어 있는 불활성 기체에 대한 off-gassing을 수행하는 것을 의미한다. Haldane과 Workman의 과포화 임계비율은 <표 3>과 같이 나타낼 수 있다.

표 3. Haldane과 Workman의 과포화 임계비율



각 조직구획별 과포화 임계비율에 따라 각 수심에서 과포화 임계값(M-value)을 정하고 그 값을 선형 그래프로 작성하면 감압 과정을 시각화할 수 있다. M은 최대(maximum)를 의미하는 것으로, M-value란 조직 장력의 최대 허용치를 나타낸다. 각 조직구획의 장력이 해당 수심의 M-value를 초과하지 않으면 신체 내 기포 발생이 되지 않는다. M-value는 각각의 조직구획에 대하여 산출되며 이는 압력으로서 ft 단위로 나타낸다. 과포화 임계비율은 어떤 기준 압력과의 비이기 때문에 M-value도 어떤 기준 압력이 있어야 한다. 수심 10 ft에서의 M-value를 M₁₀, 수면에서의 M-value를 M₀ 등으로 표현한다. 이러한 선형 그래프의 개념을 통해 각 수심의 M-value는 식 (2)와 같이 간단하게 산출할 수 있

다(Baker, 1995).

$$M = M_0 + \Delta M d \quad (2)$$

여기서 ΔM : M-value 선형 그래프의 기울기,

d : 수심(ft)

감압은 완전한 과학이 아니며 현재까지도 새로운 감압 모델이 제시되고 있다. 하지만 다양한 감압 모델들은 '불활성 기체가 혈액 관류량과 국부적인 조직-혈액 간 압력 경사도 인자를 바탕으로 하는 Haldane의 관류 방정식'을 토대로 형성되었다(Wienke, 2003). 감압은 관류 방정식을 통해 나온 조직구획의 총 기체장력이 해당 수심의 과포화 임계값을 넘지 않도록 조절하는 과정이다. 관류 방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda(P_e - P), \quad \text{초기조건 } t=0, P=P_a \text{ 적용하면,} \quad (3)$$

$$P = P_e + (P_a - P_e)\exp(-\lambda t)$$

여기서 P : 조직구획의 기체 장력,

P_e : 조직구획의 최초 기체 장력,

P_a : 혈액(동맥)내 용해된 기체 장력,

λ : 관류상수

한편, 반감시간은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$\int_0^{P_e/2} \frac{1}{P_e - P} dP = \int_0^{\tau} -\lambda dt,$$

$$\therefore \lambda = \frac{\ln 2}{\tau} = \frac{0.693}{\tau},$$

여기서 반감 시간 τ 는 λ 에 반비례한다. 따라서 식(3)의 해를 구하면,

$$\begin{aligned} P &= P_e + (P_a - P_e)\exp(-\lambda t), \\ &= P_a + (P_e - P_a)(1 - \exp(-\lambda t)), \end{aligned}$$

그리고, P 를 시간에 대한 조직구획의 총 기체 장력으로 산출하면,

$$P_t = P_o + (P_a - P_o)(1 - \exp(-\lambda t)) = P_o + (P_a - P_o)(1 - \exp^{-0.693t/\tau})$$

여기서 P_t : 조직구획의 총 기체 장력,

P_o : 조직구획의 초기 기체 장력,

P_a : 주변압,

t : 주위 압력 노출 시간,

τ : 조직구획의 반감시간

시간에 따른 조직구획의 총 기체 장력 P_t 가 과포화 M-value보다 높을 경우 혈액 내 기포가 생성될 조건을 갖추었다고 가정하므로, 조직구획이 off-gassing을 통해 M-value보다 낮아질 때까지 기다리는 과정이 잠수의 감압 정지이다.

2) 미 해군 감압 모델

본 논문에서 테크니컬 잠수체계의 분석을 위해 미 해군 감압 모델을 적용하였다. 미 해군 감압 모델은 한국 해군과 많은 잠수기관에서 준용하고 있다. 감압 모델은 잠수심도, 무감압 한계시간, 감압의 효율성과 밀접한 관련을 가지고 있으므로 그에 대한 이론적 고찰이 필요하다.

1977년에 美해군 SEAL(Sea-Air-Land)팀은 해군 당국에 감압 컴퓨터 개발을 요구했다. SEAL팀이 수행하는 잠수작전은 대부분 오랜 시간, 다단계 잠수였으나 기존의 전통적인 해군 표준 공기감압 테이블은 긴 감압시간을 요구했다. 이에 따라, 1978년에 NEDU는 해군 감압 컴퓨터 개발에 착수한다. 개발 프로젝트

의 책임자는 NEDU의 선임 의료장교였던 Ed. Thalmann 대령이었다. Thalmann은 NEDU에서 100% 순 산소 노출 한계치 연구와 감압병 치료, 그리고 새로운 감압 테이블 작성을 주로 연구했다. 이러한 연구를 통해 1985년과 1993년 개정된 미 해군 다이빙 매뉴얼에서 중요한 개정 내용을 도출해 낸다. 감압 컴퓨터를 개발하는 프로젝트는 원래 Workman에 의해 개발된 표준 감압 모델을 사용하려고 했었다. Workman에 의해 개발된 모델은 Dissolved gas model의 범주에 속하며, 모델의 기본 가설은 "혈액과 같은 액체에 용해된 기체가 압력 변화 임계치를 초과하지 않으면 기포를 형성하지 않고 용해된 상태(dissolved gas phase)를 유지한다"는 것이다. 즉, 혈액 속에 용해되어 있는 기체 장력이 외부 압력보다 높아지는 일정 임계치를 초과하기 전까지는 기포를 형성하지 않고 용해된 상태로 유지된다는 이론이다. 또한 혈액의 관류량에 따라 각 조직이 포화, 탈포화에 이르는 시간을 반감기를 적용하여 가상의 수학적 조직구획으로 분류하여 Perfusion model이라고도 지칭한다(Powell, 2010).

Thalmann은 기존 표준감압 모델을 적용하기 전에 공기와 나이트록스 잠수에 실시간 적용 측면에서 재시험을 수행했다. 연구원들은 무감압 한계가 매우 안전했고 어떤 DCS증상도 발생되지 않는다는 것을 발견했다. 그러나 50에서 190 ft의 감압 잠수에서는 약 30에서 40%의 DCS 증상이 발생되었다. 안전을 위해 부가적인 감압시간 계산이 필요했다. 60분의 표면간격을 가진 후에 수행하는 반복잠수의 감압에 있어서는 기존 시간의 2배 이상이 필요할 정도였다(Jhonson & Gerth, 2002). Thalmann과 연구진들은 감압 컴퓨터에 적용될 새로운 모델 연구에 착수했고, 그 모델은 반복잠수뿐만 아니라 일반 감압에도 더욱 안전할 수 있도록 개발되어야 했다. 그래서 개발된 모델은 기존의 할데인 모델과 이후 네오 할데인 모델에서의 가정과 동일하게 질소와 같은 불활성 기체는 지수적 확률로 신체의 조직구획에 축적된다고 가정했다. 할데인은 과포화 임계비율을 초과하지 않으면 어떠한 기포도 발생하지 않는다고 했으나 실제 도플러 사운드 실험을 통해 그 가설이 맞지 않다는 것이 밝혀졌다. Thalmann은 사실상 기포는 상승과 동시에 발생하며 그 기포로 인해 감압병의 증상이 발생되지 않을 수도 있다는 사실을 알게 된 것이다. Thalmann은 예기치 못한 기포의 발생으로

인해 조직구획의 배출의 속도는 더 느려질 것이며, 그로 인해 더 많은 기포를 형성시키는 결과를 초래할 것으로 가정했다. 따라서 Thalmann은 기체 축적의 알고리즘과 다르게 배출 비율은 지수적(Exponential) 확률보다는 오히려 직선적인(Linear) 확률로 나타날 것이라는 가설을 설정했다. 따라서 EE(Exponential-Exponential) 모델이라고 지칭되는 할데인 이론과 달리 Thalmann의 모델은 EL(Exponential-Linear) 모델로 지칭된다(Powell, 2010).

이 선형의 off-gassing 비율은 더 느린 상승률과 장시간의 감압시간을 초래했다. 이러한 연구 결과는 기존 표준 공기 감압 테이블보다 더욱 더 보수적인 감압 프로파일을 양산했다. 그리고 느린 off-gassing 비율은 이후 반복잠수에 있어 체내 높은 잔여질소시간이 정해졌으며 반복잠수의 감압은 더욱 더 보수적으로 변화되었다. <그림 4>는 EE 모델과 EL 모델을 비교한 것이다.

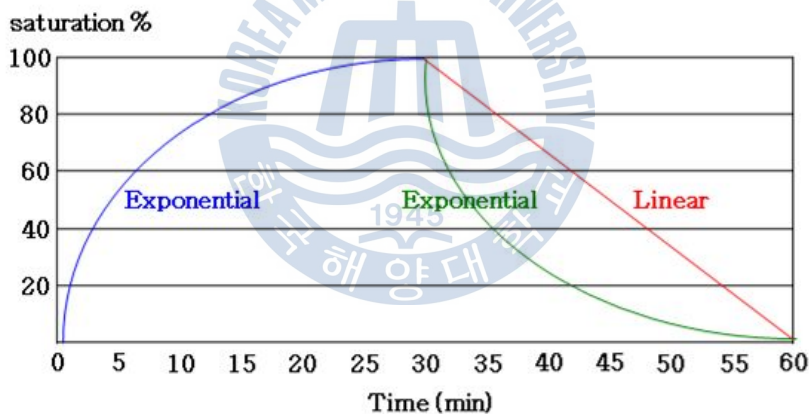


그림 4. EE 모델과 EL 모델 비교

4. 선박에 미치는 외력

묘박 중인 선박에 영향을 미치는 외적 요소로는 바람, 파랑 및 해·조류 등이 있다. 일반적으로 이러한 외적 요소들에 의해 선체에 가해지는 힘을 총칭하여

외력(external force)이라고 정의한다. 외력을 다시 세분하면 바람에 의한 풍압력(wind force), 파랑에 의한 표류력(drifting force), 해·조류에 의한 유압력(current force), 그리고 바람과 파랑에 의한 선체 운동 등이 있다. 묘박 선박이 외력에 대항하여 견디는 힘을 총칭하여 대항력(counter force)라고 정의하며, 이에는 닻에 의한 파주력(holding power)과 기관에 의한 추진력(thrust force) 등 두 가지가 있다. 이를 토대로 묘박 선박의 안전성을 평가하기 위해 외력과 대항력으로 구성되는 평형 방정식을 유도할 수 있다. 이때 외력(F_E)은 풍압력(F_W), 표류력(F_D), 유압력(F_C)을 합친 값이며, 이에 대응하는 대항력(F_S)는 파주력(F_H)과 추진력(F_T)을 합친 값이다. 이 두 힘을 같게 놓음으로써 식(4)와 같은 평형방정식이 성립된다(이 등, 2009).

$$\text{풍압력}(F_W) + \text{표류력}(F_D) + \text{유압력}(F_C) = \text{파주력}(F_H) + \text{추진력}(F_T) \quad (4)$$

외력은 공기 또는 해수 등의 유체 속에서 물체가 받는 힘을 의미하는 것으로 유동하는 유체 속에 물체를 놓았을 때 유체로부터 물체 표면에 작용하는 힘의 자유 유동방향 성분을 항력(Drag Force)이라고 한다. 항력은 식(5)와 같이 산출한다.

$$\text{항력(Drag Force)} = 1/2 \rho A u^2 C_d \quad (5)$$

여기서 ρ : 유체의 밀도,

A : 저항을 받는 면적,

u : 유체의 속도,

C_d : 항력계수

본 연구에서는 실험을 통해 상수로 획득되어진 항력계수를 적용하여 항력을 산출하였다. 항력계수는 Reynolds 수에 대한 함수로서 일반적으로 풍동실험을 통해 정확한 값을 획득할 수 있다. 그러나 실제 유동은 대부분 높은 Reynolds

수의 난류유동으로 발생되므로 속도 분포를 식 (6)과 같이 지수함수로 가정하여 산출하였다. 바람에 의해 발생하는 풍압력(F_w) 계산을 위해 먼저 높이에 따른 속도 분포를 산출하여야 한다. 묘박된 해군 함정 주위에서는 수상 및 수중 모두 난류 흐름이 형성되고 경계층 바깥의 속도(u_∞)는 거의 일정하므로 높이(h)에 작용하는 풍속은 식(6)의 Prandtl의 1/7제곱근 법칙(one-seventh power law)을 통해 추정 가능하다(하 등, 2002).

$$u = u_\infty \left(\frac{h}{10} \right)^{1/7} \quad (6)$$

해당 높이에 작용하는 풍속 산출 후, 다음과 같이 각각의 투영면적을 합산하여 식(7)과 같이 풍압력을 산출할 수 있다.

$$F_w = \sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di} \quad (7)$$

여기서 ρ : 공기의 밀도(kgm/m^3),

A_i : 풍압을 받는 투영면적(m^2),

u_i : 해당높이(h)에 작용하는 평균 풍속(m/s),

C_{di} : 투영면적 형상에 따른 항력계수

조류에 의해 발생하는 유압력(F_c)은 선체의 수면하 면적, 조류의 속도 및 방향, 그리고 항력계수 등에 의해 결정되며 식(8)과 같이 산출할 수 있다(강, 2010).

$$F_c = 1/2 \rho A u^2 C_d \quad (8)$$

여기서 ρ : 해수의 밀도(kgm/m^3),

A: 계획된 수중 면적(m^2),

u: 유속(m/s),

C_d : 항력계수

파랑에 의해 발생하는 표류력(F_D)은 규칙성분과 불규칙성분으로 나눌 수 있으며, 주기적으로 변동하는 규칙성분은 다음과 같다. Hirano(1995)에 의하면, 규칙성분인 정상 표류력은 상대 파향과 파장/선장비(λ/L)의 함수로 표현되는 표류계수와 파 진폭을 변수로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다(정·공, 2009)

$$F_D = 1/2 \cdot w \cdot C_{xw} \cdot g \cdot L \cdot h_c^2 \quad (9)$$

여기서 C_{xw} : 표류계수,

w : 해수밀도,

h_c : 파진폭,

L : 선체길이

그러나 실제 해상상태는 불규칙파이므로 위 수식의 정상 표류력에 불규칙파에 의한 영향을 고려할 필요가 있다. Remery(1973)의 연구에 의하면, 불규칙파 중의 평균 표류력은 유의파의 진폭과 평균파의 주기에 대응하는 규칙파가 갖는 표류력의 약 1/8 정도로 알려져 있다. 연안 쇄파가 해난구조 작업에 심각한 제한사항을 초래하더라도 천해파들의 특징들은 해난구조에서 그다지 중요하지 않다. 이것은 일반적으로 작업을 할 수 있으나, 없느냐의 문제일 뿐이다. 또한, 해군에서는 파고 2 m 이상 시 구조함 전개 자체를 금지하도록 규정하고 있으므로 본 논문에서 표류력에 대한 세부적인 논의는 하지 않았다.

III. 해군 구조 잠수체계 제한사항

1. 압축 공기와 관련된 제한사항

개방회로 공기 스쿠버와 표면공급 공기 잠수는 호흡기체로 압축 공기를 이용한다. 호흡기체로 압축 공기를 이용 시 고압 하에서 잠수사의 신체에 여러 가지 부작용을 유발한다. 이러한 부작용은 잠수 수심과 해저 체류시간을 제한할 뿐만 아니라 잠수사의 생명을 위협하는 요소이다.

1) 질소 마취

질소 마취는 통상 4 ata 이상의 고압 하에서 불활성 기체인 질소를 호흡하여 야기되는 지각 마비와 무의식 상태를 의미한다. 고압의 공기를 호흡함으로써 나타나는 신경학적인 영향을 보통 질소 마취라고 하는데, 중독, 정신작용 지체, 수(手)작업 능력 감소 등이 일어난다. 이러한 효과는 질소 외의 다른 불활성 기체를 호흡해도 나타나기 때문에 이들을 통칭하여 불활성 기체 마취라고도 한다. 불활성 기체 마취를 포함하여 모든 마취의 매커니즘은 아직까지도 완전히 이해되지 않고 있다. 그러나 마취를 일으키는 부위는 중추신경계의 연결(synapse)인 것으로 알려져 있다. 신경계에 작용하는 거의 대부분의 약물은 화학적 연결전달을 변형시킴으로써 작용을 한다. 마취제는 다양한 억제성 전달물질의 활동을 높여 활동 전위의 주기를 감소시킨다. 그러한 중추신경계 활동 억제는 궁극적으로 마취를 일으킨다. 연결은 신경원 사이에 있다. 뇌의 신호는 활동 전위라고 불리는 전기 전위의 형태로 신경원을 따라 전달된다. 신호는 활동 전위에 반응하여 신경 전달물질에 의해 신경원 사이의 연결을 가로질러 전달된다. 신경 전달물질은 연결 이후 신경세포 위의 특정 수용체 단백질과 결합한다. 다른 신경원들은 표적 신경원이 활동 전위를 향해 흥분 전달물질을 방출하도록 하지만 어떤 신경원은 그렇지 못하도록 억제성 전달물질을 방출하기도 한다

(Williamson et al., 1987).

수심이 깊어지면서 호흡을 통해 체내로 용해되는 질소의 분압이 일정 수준 이상이 되면 신체 신경세포의 작용을 방해하여 마취효과를 일으킨다. 이는 통상 130 ft 수심에서부터 발현되기 시작되며 200 ft에서는 현저히 나타난다. 그러나 마취현상은 일률적으로 동일한 것은 아니며 개인의 민감성에 따라 그 차이는 존재한다. 마취현상은 마치 술을 마시고 취한 상태와 유사하여 마티니 효과(Martiny effect)라고도 한다. 즉, 혼란이 오고 판단에 장애가 생겨 어떤 과제를 원활히 수행할 수 없게 된다. 또한 기억력이 저하되어 계획과 다른 행동을 할 수도 있다. 질소 마취의 세부적인 증상은 판단력 상실, 그릇된 행복감, 목적 또는 안전의식 결여, 우둔함, 실소(失笑), 입술과 잇몸, 다리의 모호한 무감각 및 저림 현상 등이 있다. 또한, 뇌 활동에 대한 명백한 마취작용에 더하여, 신경계 변화의 결과로 다른 신체 활동들도 바뀐다. 불활성 기체 마취로 인한 생리학적인 심부온도 조절(열 조절)능력 왜곡 현상이 발생한다. 마취는 떨림을 감소시켜 신체 냉각에 저항하는 주 방어능력인 신체 열 생산을 줄이므로 신체의 심부온도가 찬물에서보다 더 빨리 떨어진다. 이때 잠수사는 심부온도 저하로 인한 불편감을 별로 느끼지 못하게 된다(Mekiavic et al., 1995). 그 결과 잠수사는 열손실에 대한 조치를 등한시 하게 된다(Mount, 1998).

이러한 증상은 2-3분 내에 최고조로 나타나며 시간이 경과하더라도 증상이 악화되지는 않는다. 그리고 대기압으로 복귀하면 즉시 사라진다. 개인에 따라 마취 민감성의 차이가 있으며 반복해서 자주 노출되면 적응력을 가지게 되어 최초 마취 증상보다 이후 증상은 경미해질 수도 있다. 하지만 이러한 질소 마취가 위험한 이유는, 마취로 인해 판단력을 잃어 잠수사 자신의 안전을 저해하는 행위를 하기 때문이다(USN, 2008).

2) 산소 독성

산소 독성(Oxygen toxicity)은 높은 분압의 산소를 오래 호흡하면 발생하는 대표적인 고압 하 부정적인 생리현상이다. 인간에게 있어 없어서는 안 될 중요

한 요소인 산소는 호흡에 의해 신체 내부로 흡입되어 각 조직의 이산화탄소와 기체 교환을 하는 등 신진대사 역할을 한다. 그러나 높은 분압의 산소를 호흡할 경우 생리적 문제점이 발생되는데, 일반적으로 신체에 들어온 산소는 일부가 화학반응으로 활성산소로 변화하여 체내의 세균이나 이물질을 격퇴하고 백혈구와 같은 강력한 면역 작용을 보인다. 이 활성산소는 일반 산소보다 전자가 하나 적어 불안정한 상태여서 다른 물질 분자로부터 전자를 빼앗아 안정된 상태로 되려는 성질이 강하므로 세포 내 여러 물질과 쉽게 반응하여 그것을 변형시킨다. 우리 신체에는 활성산소를 제거하는 효소들로 인해 대기압 하에서는 문제가 없으나 산소분압이 높아져 활성산소 생성량이 너무 많아지면 미처 처리되지 못한 활성산소들이 세포 손상을 일으킨다. 이러한 세포 손상이 호흡기와 신경 계통에서 주로 발생하는데, 신경 계통에서 발생하게 되면 중추신경계 산소 독성(Central Nervous System Oxygen Toxicity)이, 호흡기 계통에서 발생하게 되면 폐 산소 독성(Pulmonary Oxygen Toxicity)이 발생한다(김, 2005).

중추신경계 산소 독성은 산소분압이 1.6 ata 이상에서 일정시간 이상 노출되었을 시 높은 분압의 산소가 중추신경계에 작용하여 인체에 부정적인 생리작용을 일으키는 현상으로서 다음과 같은 상황 하에서 주로 발생한다. 산소사용 한계 수심 또는 산소사용 한계 시간 초과, 기체 혼합 실수 또는 계산 착오, 산소 농도가 높은 기체로 재압 치료 등을 실시하는 경우 등이다. 중추신경계 산소 독성은 급작스럽고 뚜렷한 사전징후 없이 발생한다. 그러나 입술을 실룩거리거나 안면근육이 일그러지면 중추신경계 산소 독성의 초기 단계로 판단해야 한다. 중추신경계 산소 독성 증상 중 가장 치명적이고 대표적인 것이 발작(convulsion)이다. 스쿠버 잠수 중 발작이 발생하면 입에서 호흡기가 빠져 나와 익사의 원인이 된다. 다른 증상으로는 시력 이상, 청각 혼란, 입술과 안면의 근육경련, 짜증, 현기증, 졸도 등의 현상이 발생한다. 따라서 잠수 시 산소분압이 1.6 ata 이상이 되지 않도록 하며 극한 환경에서 잠수 시에는 1.4 ata 이상이 되지 않도록 해야 한다(정, 2004). <표 4>는 중추신경계 산소 독성의 주요 증상이다.

표 4. 중추신경계 산소 독성의 증상

구 분	세 부 증 상
발작 (Convulsion)	중추신경계 산소 독성에서 가장 먼저 일어나는 증상으로 갑자기 발생
시각 증상 (Vision problems)	시야 협착증으로 잠수사의 말초 시야가 감소하고 시야가 흐려지는 것과 같은 증상
청각 증상 (Ears problems)	귀울림 현상으로 외부 자극에서 비롯된 것이 아니지만 벨이 울리거나 기계가 고동치는 소리와 유사한 소리가 들림
구역질(Nausea)	메스꺼움이나 갑작스러운 구토 현상
근육 격동(Twitching)	잡은 얼굴 근육이나 입술, 손발에 경련이 일어나는 증상으로 중추신경계 산소 독성 시 가장 많이 일어나는 뚜렷한 증상
과민반응(Irritability)	혼란, 불안, 공포와 같은 정신적인 불안정 상태
현기증(Dizziness)	어지러워 균형을 잡기 힘들고, 유달리 피곤한 증상

폐 산소 독성은 산소분압이 0.5 ata를 초과 시 언제라도 발생 가능하며 60% 이상의 산소를 1 ata에서 24시간 이상 흡입하면 폐 산소 독성 현상이 발생한다. 가벼운 증상과 측정 가능한 폐 기능 저하가 발생하는 산소분압과 노출시간은 1 ata에서 12시간, 2 ata에서 4시간이다. 폐 산소 독성의 대표적인 증상은 숨을 들이쉴 때 화끈거리고 기침이 나며 진행성 통증을 수반한다. 폐 산소 독성은 낮은 산소분압에서 장시간 노출 시 흔히 발생하므로 수중 잠수사에게 발병하는 경우는 희박하며 챔버 내 치료자에게 발병할 수 있다.

3) 고탄산혈증

고탄산혈증(Hypercapnia)은 혈액과 인체 조직 내에 이산화탄소의 수치가 비정상적으로 높은 상태를 의미한다. 이산화탄소의 표준적인 허용한계는 0.5% 수면등가이다. 수면등가 0.5%를 초과한 고농도의 이산화탄소를 호흡하면 뇌에 부정적 영향을 초래하는데 그 증상은 혼돈, 집중력 감퇴, 어지러움, 의식 소실, 그리고 발작 등으로 나타난다. 이러한 증상은 잠수사가 호흡하는 이산화탄소의

농도가 증가할수록 정도가 심해진다. 2%의 이산화탄소를 호흡하면 두통이 생기고 호흡이 곤란해지며, 10%의 이산화탄소를 흡입하게 되면 몇 분 내에 의식소실로 진행되며, 15%의 이산화탄소로 호흡하면 시간에 관계없이 바로 근육의 경련과 경직이 온다.

4) 불활성 기체 축적과 배출 관련 제한사항

잠수 시 호흡하는 압축 공기는 산소와 질소로 구성되어 있다. 질소는 산소와 달리 신체 내에서 신진대사 작용을 하지 않는 불활성 기체(inert gas)로서 압력의 증감(增減)에 따라 신체 내에 축적(on-gassing) 및 배출(off-gassing)된다. 잠수 중 신체에 축적된 불활성 기체가 적절하게 배출되기 위해서는 조직구획의 총 기체 장력이 과포화 임계값보다 낮아질 때까지 일정 수심에서 체류하여야 한다. 감압행위가 제대로 수행되지 않고 수면으로 상승할 경우, 즉 잠수 후 상승 중 조직구획의 총 기체 장력이 과포화 임계값을 초과할 경우 체내 지방과 관절 부위를 중심으로 기포가 발생하여 심한 관절통증과 피부 증상 등의 부작용을 초래한다. 또한 이러한 기포가 혈관 내에서 발생하게 되면 뇌, 척수 부위의 혈액공급을 차단하여 저림, 근력 약화, 마비 등의 증상을 수반하게 된다.

감압 정지는 해저에서 수행되는 해난구조 활동과는 별개로 수중에서 체류해야 하는 시간적 부담을 초래하기 때문에 잠수 시 큰 제한사항으로 작용한다.

2. 함위 유지와 관련된 제한사항

해군에서 운용중인 표면공급 잠수는 개방회로 공기 스쿠버의 제한사항을 보완할 수 있는 잠수체계이다. 또한, 스쿠버에 비해 수중 중작업에 활용할 수 있으며 잠수모함과 유선으로 연결되어 있어 비교적 안전하다. 하지만 표면공급 잠수는 구조함이 정확히 구조 해점(salvage datum)에 함위 유지를 했을 때만이 운용 가능하다. 함위가 제대로 유지되지 않은 상태에서 표면공급 잠수 운용 시

작전의 실패는 물론, 수중 잠수사의 생명도 위협할 수 있다. 정확한 함위 유지가 안 된 상태에서 잠수를 할 경우 구조함과 유선으로 연결된 해저의 잠수사는 함의 움직임에 따라 끌려 다니거나, 최악의 경우 엄빌리컬이 절단될 수도 있다.

또한, 잠수가 종료된 후에도 구조함의 함위가 변동될 경우 정확한 on-top 위치를 유지하기 위해 재기동 또는 와이어의 조절 등 추가의 노력이 요구된다. 이처럼 함위 유지는 표면공급 잠수에 있어 필수적인 조건이며 표면공급 잠수 제한치는 바로 구조함의 함위 유지 제한치와 일치한다.

서론에서 언급했듯이 해군의 구조함은 다양한 해난구조 임무를 수행하는 함정으로, 잠수모함 이외에 많은 역할을 수행할 수 있도록 설계되어 있어 그 체적이 크고 상부에 구조물이 다수 탑재되어 있다. 이러한 점들은 함위 유지의 안정성을 저해하는 주요 원인이 된다. 특히, 한국 연안의 강조류, 짧은 정조시간 등의 불리한 외적 환경 요인은 해군 구조함의 함위 유지를 더욱 어렵게 만든다.

서해의 조류는 동중국해에서 진입하는 조석에 의해 발생하는데, 서해는 좁고 긴 만(gulf)의 형태를 띠고 있어 달과 태양에 의한 기조력에 의해 이동한 해수가 빠르게 이동하지만 북쪽 방향이 막혀있는 지리적 여건으로 인해 해수가 고립되어 조석 간만의 차가 커지고 그에 따라 조류의 속도도 대단히 빠르다. 서해는 전 세계적으로도 조석간만의 차가 큰 것으로 유명한데 대표적으로 인천의 경우 평균조차가 약 7.3 m이며, 중부지방인 군산 근해는 5.3 m, 목포 근해는 3.1 m 정도이다. 유속은 평균 1.8-2 kts로 대단히 빠르며 간조와 만조사이의 해수흐름의 정지 현상이 발생하는 정조시간은 약 1시간 내외로 대단히 짧다(국립해양조사원, 2012).

선박에 미치는 외력은 통상 선박의 면적과 외력 속도의 제곱에 비례한다. 외력의 속도가 동일할 경우, 선박의 면적은 외력의 크기를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 따라서 구조함의 면적이 증가할수록, 크기가 클수록 미치는 외력은 증가하게 되어 함위 유지가 어렵게 된다. 해군 구조함은 잠수모함으로써의 역할 이외에도 좌초선 이초, 침선 인양, 예인, 잠수함 승조원 구조 등의 다양하고 특수한 해난구조 임무를 수행한다. 그러므로 필요한 구조장비 및 시스템의 탑재

등으로 인해 체적이 대형화 될 수밖에 없다. 현재 해군이 운용중인 수상함 구조함은 전장 87 m, 만재톤수 3,500톤이며, 잠수함 구조함은 전장 102 m, 만재톤수 4,319톤으로 외력을 받는 면적이 민간 잠수모선에 비해 대단히 큰 편이다. 하지만 대형 구조함 체계는 빠른 조류, 짧은 정조시간 등 한국 연안의 양호하지 않은 조건으로 인해 잠수작전에는 적합하지 않다. 대표적인 사례로, 2010년 천안함 구조작전 시 함미선체의 침몰 수심은 스쿠버 한계수심인 40 m를 초과하는 48 m였다. 이 수심에서는 구조함이 3묘박/4묘박을 통해 표면공급 잠수운용을 하는 것이 가장 안전한 잠수 방법이었으나, 서해의 강조류와 짧은 정조시간으로 인해 지속적인 함위 유지가 불가하였다(해군본부, 2010). 그래서 최선책으로 제한된 짧은 시간밖에 잠수할 수 없는 스쿠버 잠수를 선택하여 작전을 수행하였다.

이에 비해 민간 잠수계에서는 표면공급 잠수 시 잠수모함으로 전장 30 m 내외, 톤수 300톤 미만의 소형 바지선을 주로 활용한다. 이는 수중과 수상에서 외력을 받는 면적이 매우 적어 함위 유지에 있어 큰 장점을 가진다.

해군에서는 구조함의 함위 유지 제한사항을 파고 2 m, 풍속 20 kts, 조류 2 kts 이상으로 규정하고 있다(해군본부, 2010). 하지만 이는 각 외력이 독립적으로 작용할 경우이며 2가지 이상의 외력이 동시에 작용할 경우 실제로는 이보다 더 낮은 외력에도 함위 유지가 어려워진다. <표 5>는 해군에서 잠수함구조함을 기준으로 검토한 함위 유지 가능성 판단 내용이다. 이는 유속과 풍속을 별도로 산정해서 측정한 값이다. 하지만 조류와 바람은 순차적으로 발생하는 자연현상이 아니므로, 유속과 풍속으로 인한 외력이 동시에 발생한다면 실제로 이보다 더 낮은 외력에서 함위를 이탈할 수도 있을 것으로 판단된다.

표 5. 잠수함구조함 함위 유지 가능성 판단(해군 5전단, 2010)

유 속	함위 유지여부	풍 속	함위 유지여부
1 kts	전 조류방향 가능	10 kts	가능
1.5 kts	조류방향 40도 이내에서 가능	20 kts	가능
2 kts	조류방향 20도 이내에서 가능	30 kts	가능
-	-	40 kts	불가능

IV. 해군 구조 잠수체계 개선방안

1. 테크니컬 잠수체계 적용

1) 테크니컬 잠수와 개방회로 공기 잠수체계 간 비교 분석

해군에 테크니컬 잠수체계의 적절한 도입을 위해서는 기존 잠수체계와의 비교 분석이 필요하다. 따라서, 본 절에서는 테크니컬 잠수와 해군에서 운용중인 개방회로 공기 잠수체계 간 가용 잠수심도, 무감압 한계시간, 수중 체류 가능시간, 감압의 효율성을 비교 분석하였다.

(1) 가용 잠수심도

가용 잠수심도는 운용 체계에 따라 산소 독성과 불활성 기체 마취현상을 방지하기 위해 설정한 특정 수심이며, 고정된 값이 아니다. 즉, 잠수를 수행하는 조직, 단체별로 가용 잠수심도를 규정화하여 사용하고 있으며, 이를 초과하는 수심에서의 잠수는 예외 노출(Exceptional exposure)로 간주한다. 따라서 가용 잠수심도를 고정된 불변의 법칙으로 적용할 수는 없다. 하지만 분석을 위해 고정된 기준치가 있어야 하므로 잠수를 수행하는 공신력 있는 조직의 한계수심 규정을 조사하였다. 대상 조직은 미 해군과 미 해양대기청(NOAA) 및 테크니컬 잠수 교육단체인 IANTD(International Association of Nitrox and Technical Divers) 등 3개이다.

개방회로 공기 스쿠버와 표면공급 공기 잠수는 운용 방법 측면에서는 차이점을 보이나 동일한 공기(air)를 호흡하므로 최대 한계수심은 사실상 동일하다. 하지만 질소 마취 발생 시 위험성의 정도와 호흡기체 공급의 지속성으로 인해 표면공급 공기 잠수의 한계 수심을 60 ft 가량 더 깊게 규정하고 있다. 개방회로 공기 스쿠버는 130 ft, 표면공급 공기 잠수는 190 ft이다.

나이트록스 잠수는 높은 산소 함량으로 인해 가용심도를 낮게 제한하고 있다. 물론 산소함량 22-99%까지 모두 나이트록스 기체이지만 1% 차이로 나이트록스 기체를 모두 분류할 경우, 산소 독성의 한계치로 인해 일반 공기에 비해 유익한 차이를 나타내지 않으므로 통상 산소 함량 32%와 36% 두 가지로 분류하여 사용한다. 미 해군과 NOAA, 그리고 테크니컬 잠수 교육단체 모두 산소 분압 1.6 ata 기준으로 산소 함량 36% 나이트록스 기체는 110 ft, 32% 기체는 130 ft로 잠수심도를 제한하고 있다.

재호흡기 잠수는 잠수 중 산소분압이 일정하게 유지되므로 대단히 깊은 수심까지 잠수가 가능하다. 미 해군에서 운용 중인 재호흡기는 희석기체로 질소와 헬륨을 사용하고, 수심에 관계없이 고정 산소분압을 0.75 ata 및 1.3 ata로 유지하여 각각 가용 잠수심도를 150 ft와 300 ft로 규정하고 있다(USN, 2008). 헬륨을 희석기체로 사용할 경우, 나이트록스에 비해 가용 잠수심도가 높은 이유는 질소에 비해 헬륨의 불활성 기체 마취 증상이 약 1/4 정도 더 낮기 때문이다. 테크니컬 잠수 교육단체에서는 희석기체로 트라이믹스(산소+질소+헬륨)를 사용하고 고정 산소분압을 1.3-1.4 ata로 유지하여 가용 잠수심도를 400 ft로 규정하고 있다(IANTD, 2011). <표 6>과 <그림 5>는 각 잠수체계별 가용 잠수심도를 비교한 표이다.

표 6. 각 잠수체계별 가용 잠수심도 비교

구 분			가용 잠수심도	비 고
개방회로 공기 스쿠버 잠수			130 ft	3개 조직 공통
표면공급 공기 잠수			190 ft	미 해군 및 해양대기청
나이트록스 잠수			130 ft	3개 조직 공통
재 호 흡 기	고정 산소분압 0.75 ata	질소 희석	150 ft	미 해군 규정
		헬륨 희석	300 ft	미 해군 규정
	고정 산소분압 1.3 ata	헬륨 희석	300 ft	미 해군 규정
	고정 산소분압 1.3 ata	트라이믹스 희석	400 ft	테크니컬 잠수 교육단체

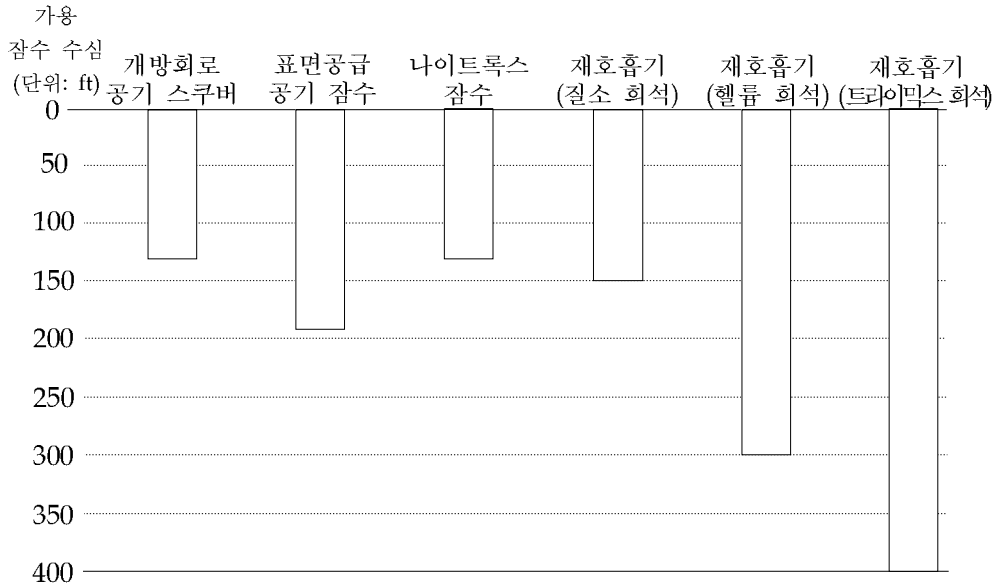


그림 5. 각 잠수체계별 가용 잠수심도 비교

각 잠수체계별 가용 잠수심도를 비교한 결과, 나이트록스는 130 ft로 개방회로 공기 잠수에 비해 가용 잠수심도가 더 낮으며 재호흡기는 희석기체로 헬륨과 트라이믹스를 사용할 경우 각각 300 ft와 400 ft로 개방회로 공기 잠수에 비해 더 깊었다. 하지만 질소를 희석기체로 사용하는 재호흡기의 경우에는 150 ft로 개방회로 공기 잠수에 비해 가용 잠수심도가 더 낮았다.

(2) 무감압 한계시간

무감압 한계시간은 각 잠수체계별로 100-200 ft까지의 수심에 대해 10 ft 단위로 비교 분석하였다. 분석 시 사용한 감압 테이블은 해군에서 준용하고 있는 미 해군 감압 테이블(Rev. 6)을 적용하였다.

개방회로 공기 스쿠버와 표면공급 공기 잠수는 동일한 호흡기체(일반 공기)를 이용하므로 무감압 한계시간이 동일하였으며, 나이트록스 잠수는 각 수심별로 허용 산소분압 1.6 ata를 초과하지 않는 최대 산소비율을 선택, 해당 수심에 대

한 등가 공기 수심을 산출하여 미 해군 테이블에서의 무감압 한계시간을 산출하였다. 재호흡기는 희석기체로 질소를 사용하는 경우와 헬륨을 사용하는 경우로 구분하였다. 또한 헬륨을 희석기체로 사용하는 경우에는 고정 산소분압을 0.75와 1.3 ata로 다시 분류하였다. <표 7>과 <그림 6>은 잠수수심별 각 잠수체계의 무감압 하 최대 체류 가능시간을 나타낸 표이다.

표 7. 잠수 수심별 각 잠수체계의 무감압 하 최대 체류 가능시간

구 분	개방회로 공기 스쿠버	표면공급 공기 잠수	나이트록스 잠수 (산소비율)	재호흡기		
				질소 희석	헬륨 희석	
					ppO ₂ 0.75	ppO ₂ 1.3
100 ft	25분	25분	39분 (36%)	27분	29분	31분
110 ft	20분	20분	30분 (36%)	23분	23분	24분
120 ft	15분	15분	25분 (33%)	20분	18분	20분
130 ft	10분	10분	20분 (32%)	16분	15분	17분
140 ft	10분	10분	15분 (30%)	14분	12분	15분
150 ft	5분	5분	10분 (28%)	11분	10분	13분
160 ft	5분	5분	5분 (27%)	10분	9분	12분
170 ft	5분	5분	5분 (26%)	9분	8분	11분
180 ft	5분	5분	5분 (24%)	×	7분	10분
190 ft	5분	5분	5분 (23%)	×	6분	9분
200 ft	×	×	×	×	6분	8분

* 단위: 분 / '×'는 감압 제한수심을 넘어 감압 테이블에 표기되어 있지 않음.

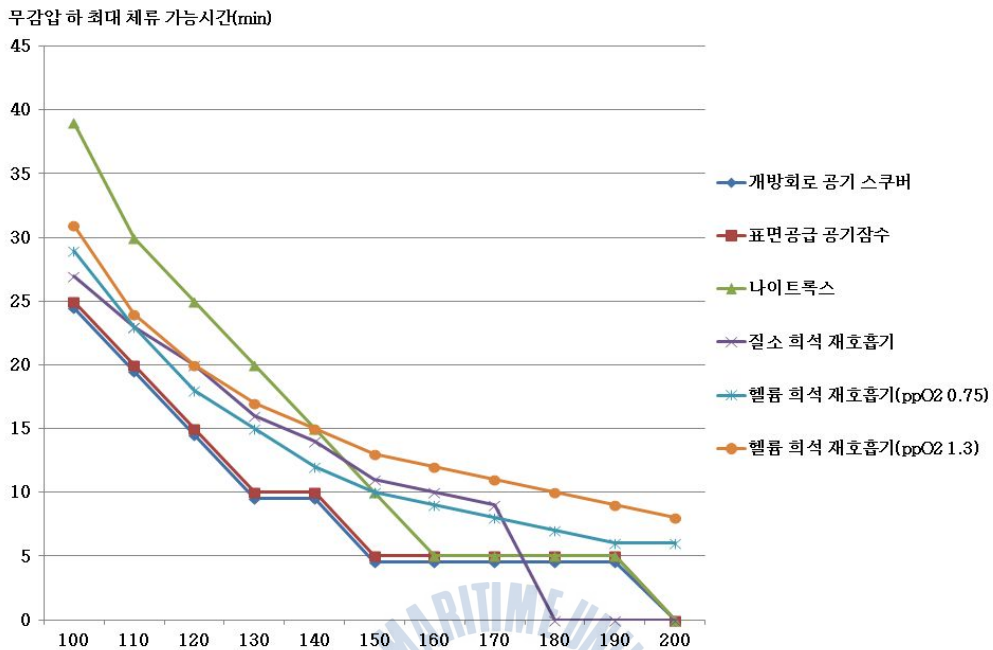


그림 6. 잠수 수심별 각 잠수체계의 무감압 하 최대 체류 가능시간

나이트록스 잠수는 개방회로 공기 잠수에 비해 수심 150 ft까지 무감압 하 최대 체류 가능시간이 더 길다. 재호흡기의 경우, 질소 희석 재호흡기는 170 ft까지, 헬륨 희석 재호흡기는 개방회로 공기 잠수에 비해 200 ft까지 감압을 하지 않고 더 오랫동안 수중에 체류할 수 있다. 150 ft에서는 나이트록스 잠수에 비해 재호흡기 잠수의 무감압 허용 한계시간이 더 길다. 이는 나이트록스 잠수가 한계수심인 130 ft 보다 깊은 수심에서 효율성이 없다는 것을 반증하는 것이기도 하다. 즉 130 ft 이상의 수심에서는 일반 공기에 비해 기체의 비율 변화로 인한 이득이 거의 없다는 것이다.

<그림 6>에서 보듯이 나이트록스와 재호흡기 잠수가 모두 일반 공기에 비해 무감압 하 최대 체류 가능시간은 더 길지만, 100 ft에서의 나이트록스 잠수를 제외하고는 모두 10분 이내의 증가율을 나타내는 등 개방회로 공기 잠수에 비해 유의한 차이를 보이지 않았다.

(3) 수중 체류 가능시간

수중 체류 가능시간은 일반적으로 잠수사가 보유한 일정한 호흡기체의 양으로 해당 수심에서 얼마나 오래 호흡할 수 있는가를 측정하여 판단할 수 있다. 물론, 수온과 외력 등의 요소로 인해 수중 체류 가능시간은 상황에 따라 유동적일 수 있으나, 변경되지 않는 고정적인 수치를 산출하기 위해서는 잠수 장비의 능력만을 고려할 수밖에 없다. 단, 표면공급 잠수체계는 육상 또는 함상의 별도 기체 공급원이 존재하므로, 휴대용 잠수체계와 수중 체류 가능시간을 비교하는 것은 무의미하므로 휴대용 잠수체계만을 대상으로 분석하였다.

휴대하고 있는 호흡기체로 수중에서 체류 가능한 시간을 측정하기 위해서는 육상에서 개인별로 호흡률을 측정 후, 압력이 증가하는 해당 심도에서 미리 측정한 호흡률을 기준으로 기체 운용 효율을 판단해야 하나, 개개인별로 호흡률이 상이하여 신체 활동량에 따른 분당 호흡률인 RMV(Respiratory Minute Volume)와 신진대사에 필요한 산소 소모량을 적용하여 계산하였다. RMV는 크게 휴식, 경작업, 보통의 작업, 중작업, 아주 힘든 중작업 등 5가지 기준으로 분류되고 인체의 신진대사에 필요한 분당 산소 소모량과 비례한다(USN, 2008). <그림 7>은 활동 수준에 따른 RMV를 나타낸 것이다.

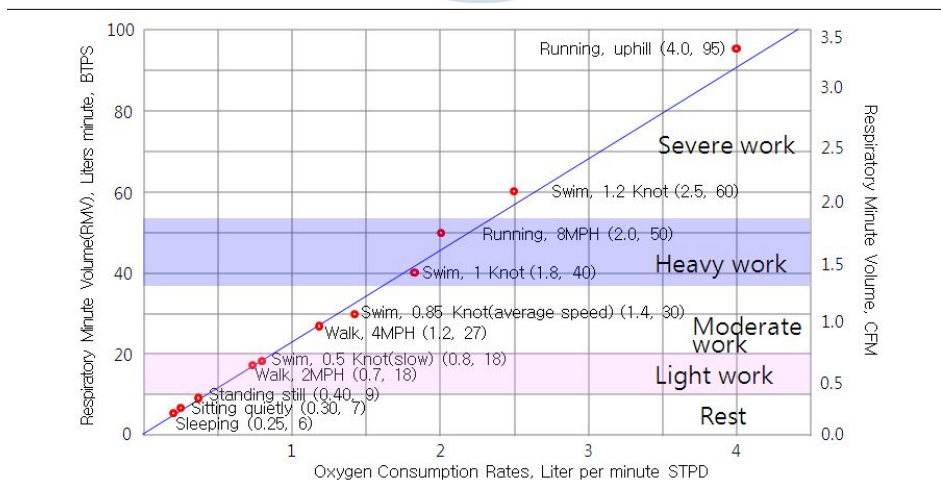


그림 7. 활동 수준에 따른 RMV(USN, 2008)

기체 운용 효율을 결정하기 위해 비교 대상인 전 잠수체계에 동일한 용적과 압력을 적용해야 하므로 일률적으로 NAVSEA(Naval Sea Systems command, 미 해군 해상체계사령부) 군사표준(MIL-STD) steel 72형 실린더를 적용하였다. <표 8>은 NAVSEA 군사표준 steel 72형 실린더 정보를 나타낸 것이다.

표 8. NAVSEA 군사표준(MIL-STD) steel 72형 실린더 정보

작동압력	누기 체적	예비압력	실린더 체적
2,250 psig	0.420 cf	500 psig	64.7 cf

개방회로 잠수체계의 경우, 호흡기체 사용 지속시간은 RMV를 적용하여 호흡 기체로 호흡하는 수심(압력)에서 잠수사의 평균 공기소모율(C)을 정한 후, 사용 가능한 기체 실린더의 총 부피(V_a)를 나눔으로써 산출 가능하다. 즉, 호흡기체 사용 지속시간은 V_a/C 이다. 평균 공기소모율과 사용 가능한 기체 실린더의 총 부피는 식(10), (11)과 같이 산출한다.

$$C = (D+33)/33 \times RMV \quad (10)$$

여기서 C: 해당 수심에서 잠수사의 평균 공기 소모율(SCFM),

D: 해당 수심(ft)

$$V_a = (P_c - P_m)/14.7 \times F_v \times N \quad (11)$$

여기서 P_c : 실린더의 작동압력,

P_m : 실린더의 예비압력(잔존 최소압력),

F_v : 누기체적,

N: 실린더의 개수

재호흡기와 같은 폐쇄회로 잠수체계의 경우, 호흡기체 사용 지속시간은 개방회로 잠수체계와 달리 해당 수심(압력)의 영향을 받지 않으므로 인체 신진대사에 필요한 산소 소모량과 온도차에 따른 압력 변화의 영향을 고려하여야 한다. 폐쇄회로 잠수체계의 호흡기체 사용 지속시간은 식(12)와 같이 산출할 수 있다.

$$\text{사용 지속시간} = F_v \times \frac{[(P_1 \times T_2 / T_1) - P_R]}{V_{O_2} \times 14.7} \times \frac{492}{T_2} \quad (12)$$

여기서 F_v : 누기체적(cf),

P_r : 최초 압력(psi),

P_R : 예비압력(잔존압력),

V_{O_2} : 산소 소모율(scfm),

T_1 : 잠수 전 온도(랭킨 온도),

T_2 : 예상되는 잠수 수심에서의 온도(랭킨 온도)

상기와 같은 방법으로 휴대용 잠수체계의 수중 체류 가능시간을 비교·분석하기 위하여, 수심은 100에서 300 ft까지로 구분하였으며, 폐쇄회로 잠수체계의 호흡기체 사용 지속시간에 영향을 미치는 수온은 8월 기준 동해 수온의 연직분포를 적용하였다(국립해양조사원, 2012). 수온의 연직분포는 계절에 따라 다양하게 변화하므로 고정된 값은 아니지만, 비교의 유의성을 향상시키기 위해 고정 해점에서 수온변화가 상대적으로 큰 동해의 8월 기준 수온 연직분포를 적용하였다. RMV와 산소 소모량은 수중 중작업 시 필요한 양으로 각각 1.5 ACFM과 0.052 SCFM을 적용하였다. 이는 잠수사가 1 kts의 속도로 수영할 때 필요한 공기 및 산소 소모량이다. <표 9>와 <그림 8>은 수심과 수온에 따른 각 잠수체계별 호흡기체 지속시간을 비교한 것이다.

표 9. 수심과 수온에 따른 각 잠수체계별 호흡기체 지속시간 비교 (단위: 분)

구 분		개방회로 공기 스쿠버	나이트록스 잠수	재호흡기
수 심	수 온			
30.5 m (100 ft)	14.1 ℃	18.9	18.9	871
33.5 m (110 ft)	13.65 ℃	17.5	17.5	871
36.6 m (120 ft)	13.2 ℃	16.4	16.4	871
39.6 m (130 ft)	12.55 ℃	15.4	15.4	871
42.6 m (140 ft)	11.9 ℃	14.5	14.5	859
45.7 m (150 ft)	11.25 ℃	13.7	13.7	868
48.7 m (160 ft)	10.6 ℃	13.0	13.0	868
51.8 m (170 ft)	10.6 ℃	12.3	12.3	868
54.8 m (180 ft)	10.6 ℃	11.8	11.8	868
57.9 m (190 ft)	10.6 ℃	11.2	11.2	868
60.9 m (200 ft)	10.6 ℃	10.7	10.7	868
64.0 m (210 ft)	10.6 ℃	10.3	10.3	868
67.0 m (220 ft)	10.6 ℃	9.9	9.9	868
70.1 m (230 ft)	10.6 ℃	9.5	9.5	868
73.1 m (240 ft)	10.6 ℃	9.2	9.2	868
76.2 m (250 ft)	10.6 ℃	8.8	8.8	868
79.2 m (260 ft)	10.6 ℃	8.5	8.5	868
82.2 m (270 ft)	10.4 ℃	8.2	8.2	868
85.3 m (280 ft)	10.4 ℃	8.0	8.0	868
88.3 m (290 ft)	10.4 ℃	7.7	7.7	868
91.4 m (300 ft)	10.4 ℃	7.5	7.5	868

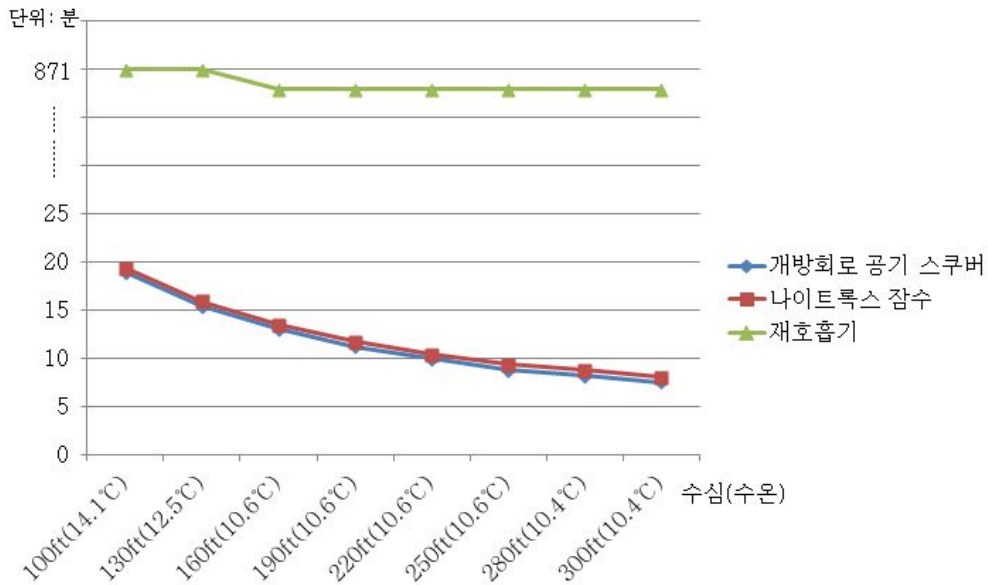


그림 8. 수심과 수온에 따른 각 잠수체계별 호흡기체 지속시간 비교

개방회로와 폐쇄회로 잠수체계에 있어 동일한 체적의 호흡기체를 사용할 경우 호흡기체 사용 지속시간은 수심에 따라 약 46에서 115배까지 차이가 난다. 같은 잠수체계 사용 시에도 호흡기체 사용 지속시간은 수심에 따라 많이 차이를 보인다. 개방회로 잠수의 경우 100 ft와 300 ft에서는 호흡기체 사용 지속시간이 최대 2.52배까지 차이가 난다. 하지만 재호흡기의 경우는 약 1.003배 정도로 거의 차이가 나지 않는다. 즉, 재호흡기는 잠수 수심의 증대에 따른 압력 상승에 관계없이 호흡기체 운용의 높은 효율성을 유지할 수 있다.

그러나 재호흡기의 정확한 수중 체류 가능시간을 분석하기 위해서는 호흡기체 사용 지속시간 외에도 이산화탄소 여과제 성능 지속시간을 고려하여야 한다. 소다라임(sodalime)을 비롯한 이산화탄소 여과제는 일정 시간 이후에 화학적 여과 능력의 한계에 도달하여 반응속도가 느려진다. 이 시점을 Break-through point라고 하며, 이는 온도에 따라 그 도달시간이 달라진다. 즉, 이산화탄소 여과제의 성능 지속시간은 수온에 따라 달라진다. 이는 여과제의

근본적인 화학반응 속도가 온도에 따라 달라지기 때문인데, 온도가 올라가면 이산화탄소를 탄산칼슘과 물로 변환시키는 화학반응 속도가 상승하므로 여과제가 더욱 활발하게 반응하기 때문에 수온이 높은 곳에서는 여과장치의 성능이 높아진다(Mount et al., 2010). 미 해군의 경우 'MK-16 Mod 0'라는 폐쇄회로 재호흡기에 장착된 이산화탄소 여과제에 대한 실험을 통해 수온에 따른 여과제의 성능 지속시간을 표와 같이 측정하였다(USN, 2008). <표 10>은 미 해군 폐쇄회로 개호흡기의 수온에 따른 여과제 성능 지속시간을 나타낸 것이다.

표 10. 미 해군 폐쇄회로 재호흡기의 수온에 따른 여과제 성능 지속시간

희석기체	수 온	수 심	지속시간
헬 립	4.4℃ 이상	0-300 ft	300분
	-1.7-3.9℃	0-100 ft	300분
	1.7-3.9℃	101-300 ft	240분
	-1.7-3.9℃	101-300 ft	120분
질 소	-1.7℃ 이상	0-50 ft	300분
	4.4℃ 이상	51-150 ft	200분
	1.7-3.9℃	51-150 ft	100분

물론, 폐쇄회로 재호흡기의 종류에 따라 여과제 성능 지속시간은 각기 다르지만, 여과제가 무한정 사용 가능한 것이 아니기 때문에 수중 체류 가능시간을 분석하기 위해서는 반드시 고려하여야 할 사항이다.

(4) 감압의 효율성

감압의 효율성은 각 잠수체계가 동일한 수심과 해저체류시간에 노출되었을 시 감압시간을 측정, 분석함으로써 평가할 수 있다. 감압시간 측정을 위해 미

해군 감압 테이블을 활용하였으며, 그 중 개방회로 공기 스쿠버와 표면공급 공기 잠수는 동일한 공기 감압 테이블을 활용하였고, 나이트록스 잠수는 등가 공기 수심 계산을 통해 해당되는 수심의 공기 감압 테이블을 적용하였다. 재호흡기 잠수는 산소분압이 0.75, 1.3 ata로 유지되고 질소와 헬륨을 희석기체로 각각 사용하는 미 해군 폐쇄회로 잠수 감압 테이블을 적용하였다. 고정 산소분압 0.75 ata를 적용한 폐쇄회로 잠수 감압 테이블은 질소와 헬륨 희석기체로 구분되어 미 해군 다이빙 매뉴얼에 명시되어 있지만, 고정 산소분압 1.3 ata(헬륨 희석기체)를 적용한 테이블은 매뉴얼에 나와 있지 않다. 이는 별도로 '1.3 ata PO₂-in-He Decompression tables for MK 16 MOD 1 Diving'이라는 2002년 NEDU 보고서를 적용하였다.

감압의 효율성 분석을 위해서 100 ft에서 190 ft까지 10 ft 단위로 각 잠수체계별 감압시간을 비교·분석하였다. 그리고 해당 수심에서의 해저 체류시간은 20분에서 50분까지 10분 단위로 분류하였다. <표 11>은 수심-해저체류시간별 각 잠수체계의 감압시간을 비교한 표이며, <그림 9>부터 <그림 18>은 수심별로 각 잠수체계의 감압시간을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 OC는 Open Circuit(개방회로)를 의미하며 재호흡기의 N과 H는 각각 희석기체를 나타내는 것으로 질소와 헬륨을 의미한다. 희석기체 이니셜 뒤의 숫자는 재호흡기의 고정 산소분압(ata 단위)를 나타낸다. 그리고 <표 11>에서 밑줄이 표시된 부분은 예외 노출을 나타낸 것이다.

표 11. 수심-해저채류시간별 각 잠수체계 감압시간 비교 (단위: 분)

수 심	구 분	해저 채류시간			
		20분	30분	40분	50분
100	OC 스쿠버 잠수	0	3	26	47
	나이트록스 잠수	0	0	0	2
	재호흡기(N,0.75)	0	6	28	47
	재호흡기(H,0.75)	0	1	19	31
	재호흡기(H,1.3)	0	0	4	16
110	OC 스쿠버 잠수	0	14	39	71
	나이트록스 잠수	0	0	14	31
	재호흡기(N,0.75)	0	18	43	64
	재호흡기(H,0.75)	0	14	33	47
	재호흡기(H,1.3)	0	4	10	31
120	OC 스쿠버 잠수	2	24	51	<u>95</u>
	나이트록스 잠수	0	3	26	47
	재호흡기(N,0.75)	0	30	57	<u>80</u>
	재호흡기(H,0.75)	2	27	47	66
	재호흡기(H,1.3)	0	8	23	47
130	OC 스쿠버 잠수	4	34	71	<u>138</u>
	나이트록스 잠수	0	3	26	47
	재호흡기(N,0.75)	5	41	<u>71</u>	<u>97</u>
	재호흡기(H,0.75)	8	40	63	86
	재호흡기(H,1.3)	3	13	37	63
140	OC 스쿠버 잠수	7	44	<u>91</u>	<u>180</u>
	나이트록스 잠수	2	24	51	<u>95</u>
	재호흡기(N,0.75)	14	53	<u>85</u>	<u>120</u>
	재호흡기(H,0.75)	17	52	78	109
	재호흡기(H,1.3)	7	18	51	78
150	OC 스쿠버 잠수	14	54	<u>124</u>	<u>216</u>
	나이트록스 잠수	7	44	<u>91</u>	<u>180</u>
	재호흡기(N,0.75)	21	64	<u>100</u>	<u>150</u>
	재호흡기(H,0.75)	27	65	93	147
	재호흡기(H,1.3)	10	30	65	95

수심	구 분	해저 체류시간			
		20분	30분	40분	50분
160	OC 스쿠버 잠수	22	69	<u>162</u>	<u>264</u>
	나이트록스 잠수	22	69	<u>162</u>	<u>264</u>
	재호흡기(N,0.75)	<u>31</u>	<u>76</u>	<u>121</u>	<u>183</u>
	재호흡기(H,0.75)	37	78	113	186
	재호흡기(H,1.3)	13	42	80	111
170	OC 스쿠버 잠수	30	<u>88</u>	<u>197</u>	<u>311</u>
	나이트록스 잠수	30	<u>88</u>	<u>197</u>	<u>311</u>
	재호흡기(N,0.75)	<u>40</u>	<u>89</u>	<u>146</u>	<u>218</u>
	재호흡기(H,0.75)	47	91	150	231
	재호흡기(H,1.3)	17	54	95	128
180	OC 스쿠버 잠수	38	<u>106</u>	<u>228</u>	<u>354</u>
	나이트록스 잠수	38	<u>106</u>	<u>228</u>	<u>354</u>
	재호흡기(N,0.75)	-	-	-	-
	재호흡기(H,0.75)	57	104	188	<u>274</u>
	재호흡기(H,1.3)	20	67	109	145
190	OC 스쿠버 잠수	45	<u>139</u>	<u>272</u>	<u>409</u>
	나이트록스 잠수	45	<u>139</u>	<u>272</u>	<u>409</u>
	재호흡기(N,0.75)	-	-	-	-
	재호흡기(H,0.75)	67	121	229	<u>319</u>
	재호흡기(H,1.3)	25	80	126	162

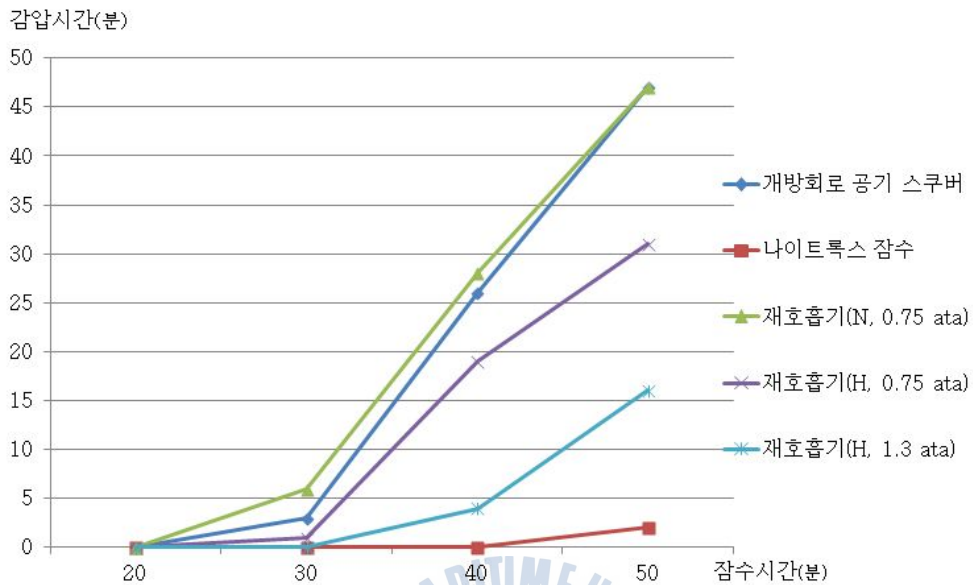


그림 9. 100 ft 잠수 시 감압시간 비교

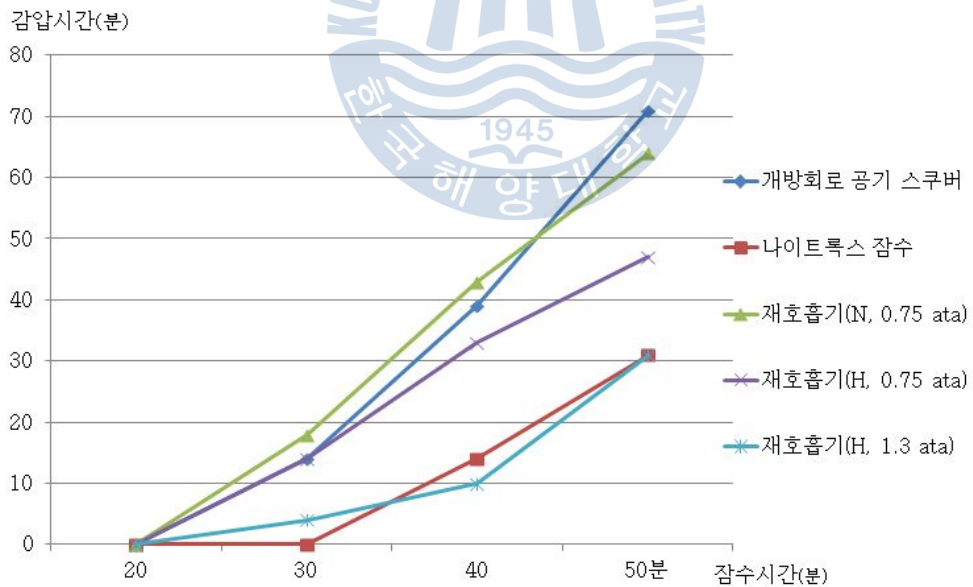


그림 10. 110 ft 잠수 시 감압시간 비교

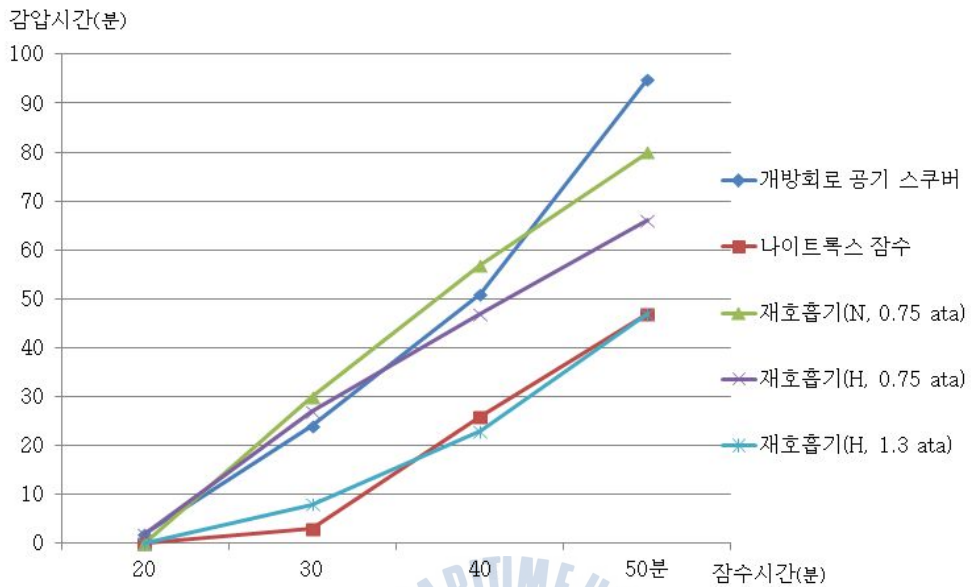


그림 11. 120 ft 잠수 시 감압시간 비교

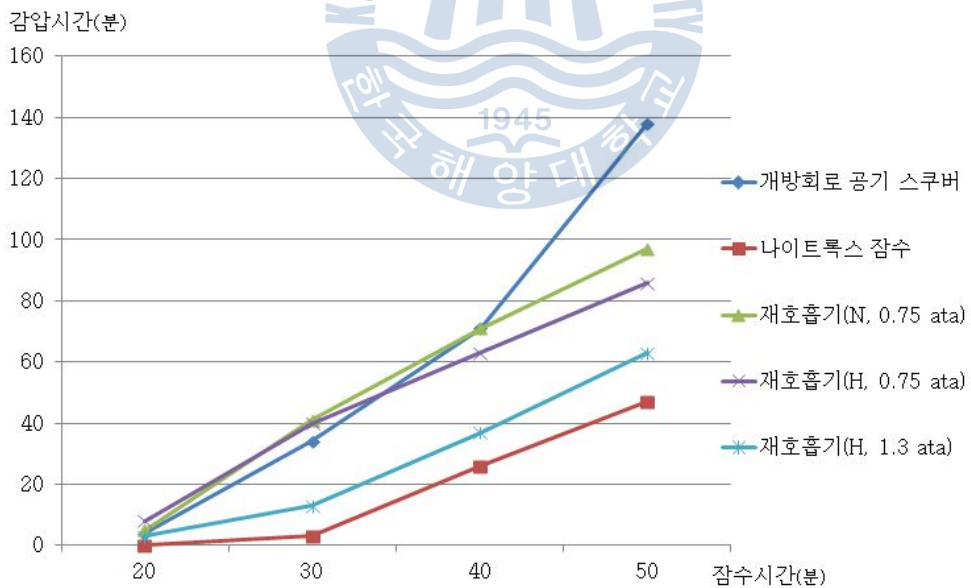


그림 12. 130 ft 잠수 시 감압시간 비교

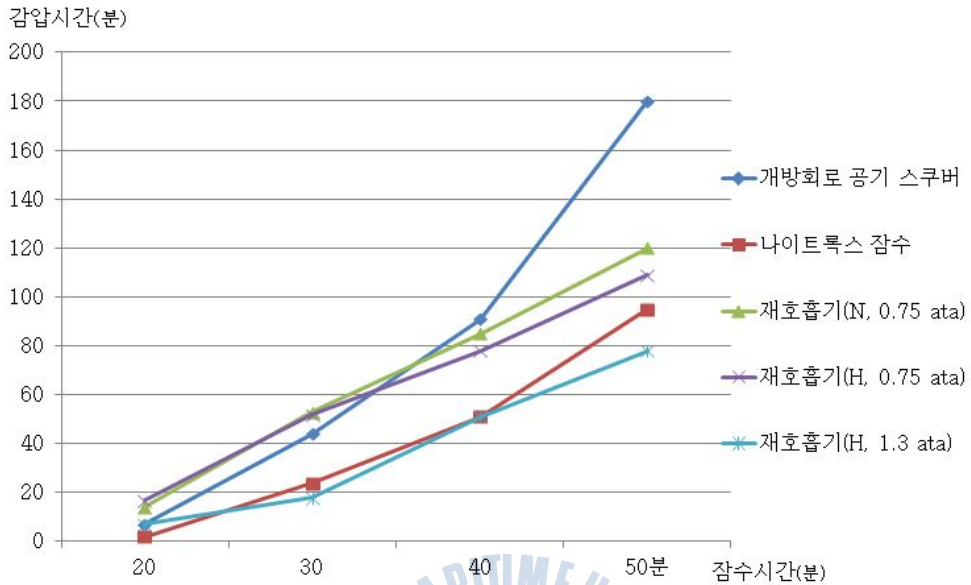


그림 13. 140 ft 잠수 시 감압시간 비교

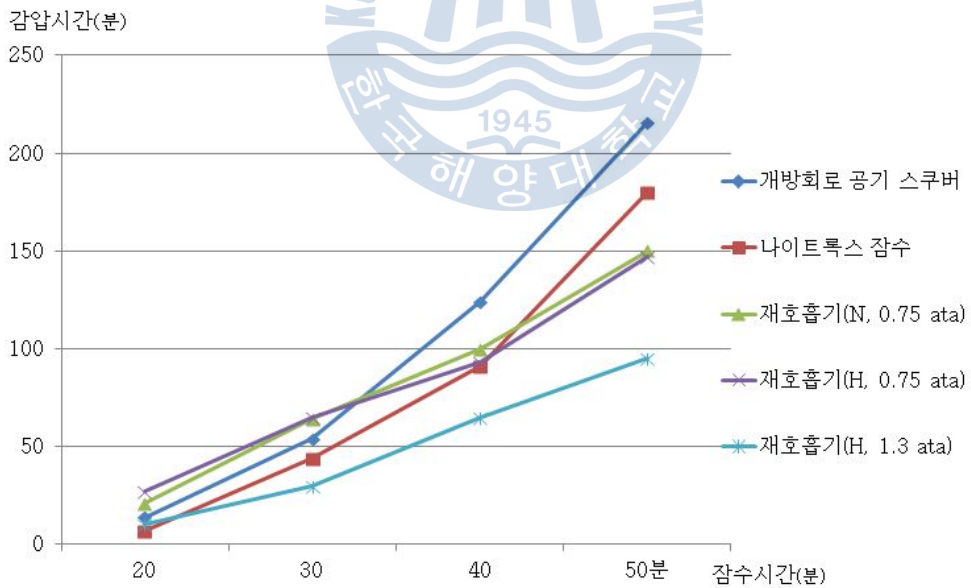


그림 14. 150 ft 잠수 시 감압시간 비교

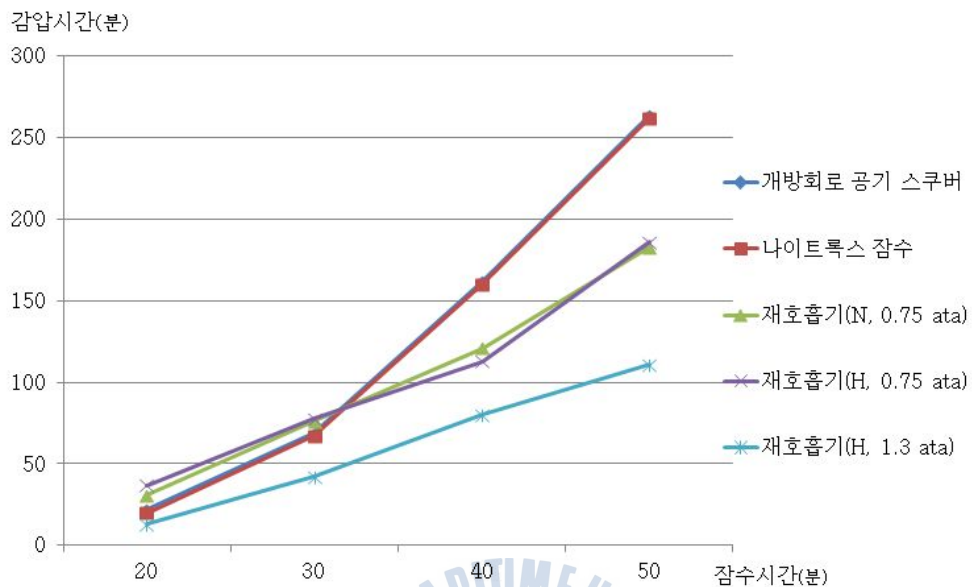


그림 15. 160 ft 잠수 시 감압시간 비교

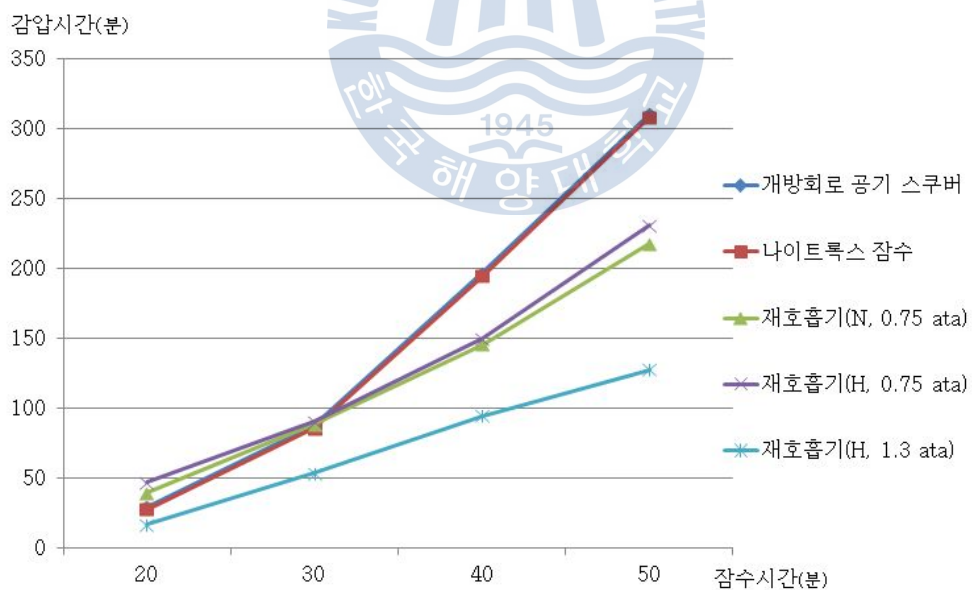


그림 16. 170 ft 잠수 시 감압시간 비교

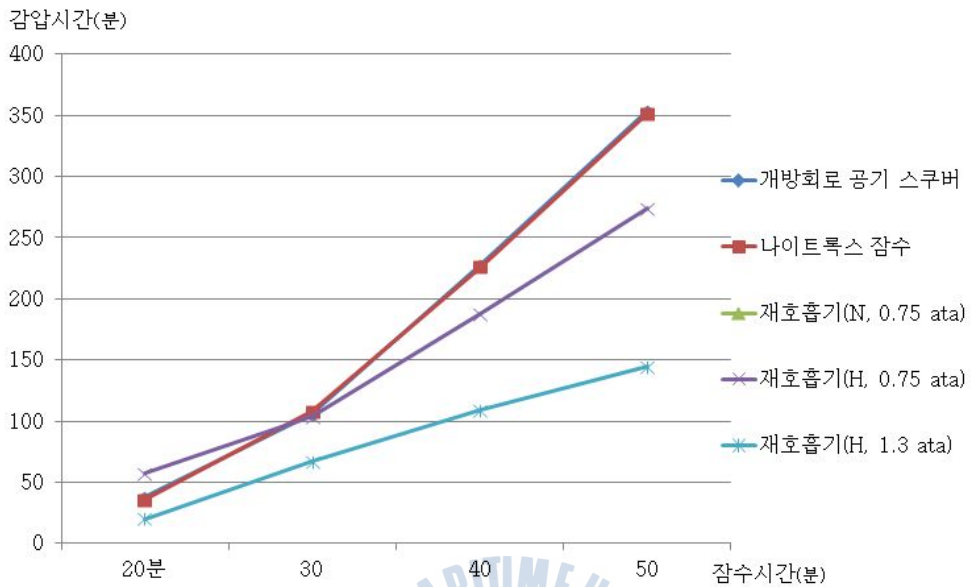


그림 17. 180 ft 잠수 시 감압시간 비교

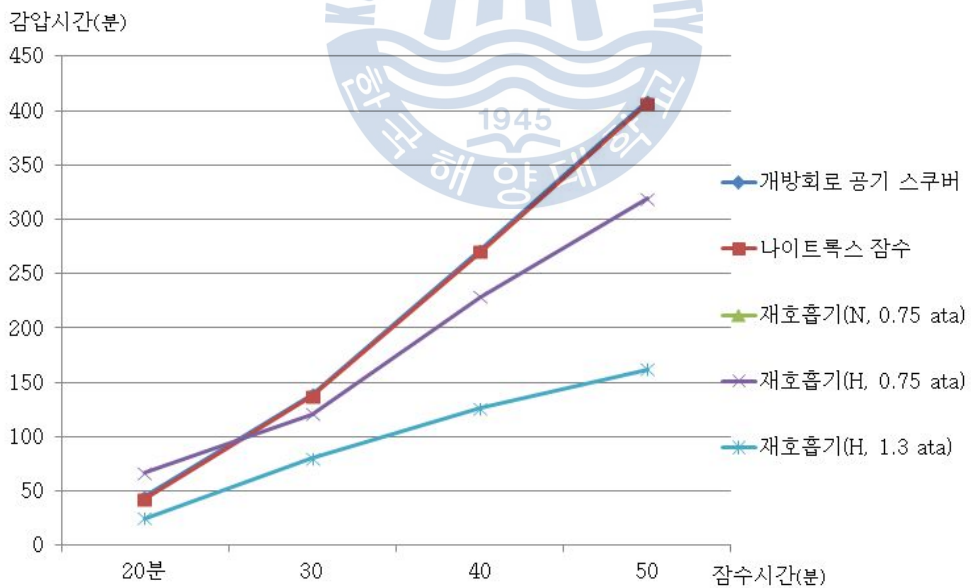


그림 18. 190 ft 잠수 시 감압시간 비교

상기와 같이 감압의 효율성을 분석한 결과, 140 ft 이내 수심에서 나이트록스 잠수는 개방회로 공기 스쿠버에 비해 현저한 감압 효율성을 나타낸다. 특히, 나이트록스 잠수로 100 ft에서 50분 해저 체류 시 감압시간이 2분인 것에 비해 개방회로 공기 스쿠버의 감압시간은 47분이 소요된다. 이는 100 ft에서 개방회로 공기 스쿠버가 아닌 나이트록스 잠수를 할 경우 해저에서 45분간의 연장된 작업시간을 보장받을 수 있다는 의미이기도 하다. 140 ft 이내에서 나이트록스 잠수는 개방회로 공기 스쿠버에 비해 평균적으로 약 6.3배의 감압 효율성을 보였다. 그러나 150 ft 이상의 수심에서는 유의한 차이를 보이지 않으며 160 ft 이상에서는 개방회로 공기 스쿠버와 동일한 감압시간이 요구된다.

재호흡기는 고정 산소분압에 따라 개방회로 공기 잠수와 감압 효율성 차이가 크게 나타났다. 희석기체에 관계없이 고정 산소분압 0.75 ata를 유지하는 재호흡기는 30분 이내의 해저체류 시 개방회로 공기 스쿠버에 비해 더 긴 감압이 요구되었으며, 30분 이상의 해저체류 시에도 개방회로 공기 스쿠버에 비해 유의한 차이를 보이지는 않았다. 즉, 고정 산소분압 0.75 ata는 개방회로 공기 스쿠버의 수심별 산소분압보다 낮은 경우가 많아 그만큼 불활성 기체의 신체 축적이 많아지므로 감압 효율성 측면에서는 장점을 가지지 못한다.

하지만 고정 산소분압 1.3 ata를 유지하는 재호흡기는 개방회로 공기 스쿠버에 비해 유의한 차이를 보였다. 나이트록스 잠수에 비해서는 감압 효율이 낮으나 개방회로 공기 스쿠버에 비해서는 평균적으로 약 2.16배가 높았다. 고정 산소분압 1.3 ata를 유지하는 재호흡기가 수치적으로는 나이트록스 잠수에 비해 감압 효율이 낮으나, 수심과 해저 체류시간이 증가할수록 개방회로 체계인 나이트록스 잠수의 빠른 호흡기체 소모를 고려 시 오히려 재호흡기의 상대적 효율은 향상되므로 150 ft 이상의 수심에서는 감압 측면에서 대단히 우수한 체계라 할 수 있다.

2) 테크니컬 잠수체계 적용 방안

테크니컬 잠수를 해군 해난구조작전에 적용하기 위해서는 각 체계별 장점과 단점을 분석하여 수심별로 구분 운용할 필요가 있다. 먼저, 130 ft(약 40 m) 이내 수심에서는 나이트록스 잠수를 우선적으로 적용, 운용해야 한다. 전술한 분석 결과와 같이 나이트록스 잠수는 130 ft 이내의 수심에서 개방회로 공기 스쿠버에 비해 무감압 하 수중 체류 가능시간이 극대화되고, 장시간 수중 체류 시 감압시간의 극적인 감소가 가능하다. 개방회로 공기 잠수에 비해 나이트록스의 높은 산소 비율은 적절한 기준 내에서 불활성 기체의 체내 흡수를 최소화할 수 있기 때문이다. 그러나 최소화된 불활성 기체 흡수율만큼 고산소로 인한 위험성은 높아지므로 산소분압이 1.6 ata를 초과하지 않도록 130 ft 이내의 수심에서만 적용해야 한다. 개방회로 공기 스쿠버와 나이트록스 잠수는 산소의 함량만 상이할 뿐, 동일한 개방회로이며 호흡기체의 지속시간도 동일하지만 130 ft 이내의 수심에서 개방회로 공기 스쿠버에 비해 감압에 대한 이점을 가지므로 해군이 130 ft 이내의 수심에서 공기 스쿠버가 아닌 나이트록스 잠수로 대체 운용한다면 해난구조작전 효율성이 크게 향상될 것이다.

또한 나이트록스 기체는 부분압 혼합 방식을 이용하여 순수 산소를 보유하고 있는 욕상이나 함정(선박)에서 간단하게 제작 가능하다(Wells & Phoel., 1995). 해군은 욕상과 구조함에 순수 산소를 보유하고 있으며, 산소의 분압 측정을 위한 산소분압 측정기 역시 보유하고 있다(해군작전사령부, 2001). 따라서 별도의 장비 신규 도입 없이도 나이트록스 잠수체계 운용이 가능하다.

장비 측면 외에도 나이트록스 잠수를 운용하기 위해서는 운용에 대한 교육이 필요하다. 해군 구조부대는 잠수사 교육의 기본과정으로 병, 부사관, 장교 과정 교육을 수행 중이며, 개방회로 공기 스쿠버는 동일한 교과과정으로 3개 과정에서 공동교육을 실시한다. 나이트록스 잠수는 일반 공기 스쿠버에 추가하여 산소 부분압이 신체에 미치는 영향과 등가 공기 수심에 대한 내용만을 추가 심화 학습하면 운용이 가능하다. 물론 잠수생리 교육 과목에서 산소 부분압에 대한 교육을 수행하지만, 다시 상기시키는 차원의 교육이 필요할 것이다. 또한 나이

트록스 기체혼합에 대한 교육과정이 필요한데, 이는 부분압에 대한 기본적인 이해도가 있으면 간단히 이해 가능한 교육이다. <표 12>는 현재 해군 구조부대의 개방회로 공기 스쿠버 교육과정 및 민간 테크니컬 잠수 교육단체의 나이트록스 교육과정을 비교한 표이다.

표 12. 해군 구조부대와 민간 테크니컬 잠수 교육단체 교육과정 비교

해군 구조부대 교육내용	민간 테크니컬 잠수 교육단체 교육내용
잠수 생리 <ul style="list-style-type: none"> ○ 불활성 기체 마취 ○ 산소 독성 ○ 감압병 및 기타 잠수질환 	나이트록스 잠수 생리 <ul style="list-style-type: none"> ○ 산소 독성 ○ 감압병
잠수 물리 <ul style="list-style-type: none"> ○ 압력과 기체 상관관계 ○ 보일, 돌턴, 헨리 법칙 	나이트록스 잠수 물리 <ul style="list-style-type: none"> ○ 압력과 기체의 상관관계 ○ 돌턴 및 헨리의 법칙
감압 교육 <ul style="list-style-type: none"> ○ 감압이론 ○ 감압표 운용법 ○ 비상절차 	감압표 교육 <ul style="list-style-type: none"> ○ EAD 개념 및 산출
실 습 <ul style="list-style-type: none"> • 50시간 이상 • 위기상황 대처훈련 • 130 ft 자격 잠수 	기체혼합 등 운용법 <ul style="list-style-type: none"> ○ 4 - 6번의 잠수 ○ 최소 90분 이상 잠수기록 충족

상기 <표 12>와 같이 해군의 개방회로 공기 스쿠버 교육과 나이트록스 잠수 교육 과정은 거의 흡사하다. 민간의 경우 짧은 시간에 레저 활동을 목적으로 잠수 초보자에 대한 교육을 주로 수행하므로 간단하면서도 개념 위주의 교육을

실시하며 실습 역시 개방수역에서의 경험 잠수 위주로 실시하고 있다. 하지만 해군은 수중 전문 구조인력 양성을 목적으로 하고 있어 교과별 부여된 교육시간이 장시간이며 기초부터 세부적인 내용까지를 다루고 있다. 따라서 해군에서는 별도의 추가 교육 과정 편성 없이도 나이트록스 잠수 교육이 가능하다. 잠수 생리학과 감압교육 시간을 조절하여 산소 부분압과 등가 공기 수심, 기체 혼합에 대한 교육을 수행할 수 있다. 또한, 교육 기(既)수료자의 경우에는 별도로 추가 실무 교육훈련을 활용하여 나이트록스 잠수 운용이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 과정을 통해 구조부대의 병사에서부터 간부까지 모두 나이트록스 잠수 수행이 가능하게 될 것이다.

재호흡기의 경우, 고정 산소분압 0.75 ata의 질소 및 헬륨 희석 재호흡기는 개방회로 공기 잠수에 비해 유의한 차이를 보이지 않았으며, 오히려 짧은 시간의 잠수를 수행할 경우 더 긴 감압시간이 요구되었다. 이들 재호흡기는 수중 정숙성과 호흡기체 사용 지속시간 측면에서만 장점을 가진다. 수중 정숙성은 특수전(Special Warfare)에서는 상당히 유리하지만, 해난구조작전에서는 큰 장점으로 작용하지 못한다. 따라서 구조잠수에는 고정 산소분압 1.3 ata의 헬륨 희석 재호흡기 적용이 필요하다. 고정 산소분압 1.3 ata의 헬륨 희석 재호흡기는 일정한 호흡기체의 양으로 수심에 관계없이 장시간 해저 체류가 가능하고 개방회로 공기 스쿠버에 비해 2.16배의 감압 효율을 가짐과 동시에, 깊은 수심에서 불활성 기체 마취의 위험이 없으므로 심해잠수 작전에 적합한 체계이다. 이는 현용 해군의 표면공급 잠수체계와 비교 시 대단히 간편하고 수중 기동성 증대가 가능하다. 하지만 재호흡기 잠수체계를 적용하기 위해서는 중요하게 고려해야 할 요소가 있다. 이는 이산화탄소 검출과 관련된 문제점인데, 재호흡기 회로 내의 이산화탄소를 측정해보려는 욕망은 기술적인 해결책만큼 오래된 것이다. 인체 생리는 이산화탄소에 매우 취약하지만 그것에 대해 어떤 신뢰할 만한 경고 시스템을 보유하고 있지 않다. 즉, 재호흡 시스템 내부에 장착되어 있는 이산화탄소 여과제가 완벽하게 이산화탄소를 여과할 수 있는지를 확인할 수 있는 시스템이 현재 연구 중이나 아직까지 성공한 결과는 없었다(Mount et al., 2010). 재호흡기 사고에 대한 정확한 통계는 문헌상 나와 있지 않지만 재호흡기

사고의 일부가 수중 중작업을 통한 호흡량 증대와 그에 따른 이산화탄소 누적과 연관되어 있다. 따라서 해군 해난구조작전에 재호흡기를 적용할 경우 이산화탄소 누적으로 인한 신체적 부작용을 방지하기 위해 중작업에 사용하지 않고 경작업과 탐색, 최초 심해 대응 등의 용도로 활용해야 한다. 이러한 취지에서 현재 해양경찰에서도 심해 대응 및 대심도 탐색 장비로 재호흡기를 도입, 운용하고 있다(해양경찰청 경비안전국, 2011).

또한, 해난구조작전에 적합한 재호흡기의 형태(shape)에 대한 검토가 필요하다. 이는 호흡낭의 위치 및 견고성과 관련된 것으로서, 민간 잠수계에서는 잠수사가 앞 혹은 뒤로 누운 자세로 유영을 하면서 수중 활동을 수행하므로 호흡낭이 신체를 기준으로 앞, 뒤 어디에 부착되어 있는지의 여부가 호흡저항 판단 기준이 될 수 있다. 현재 개발되어 있는 다양한 재호흡기는 각각 호흡낭의 위치가 서로 상이하다. <그림 19>는 호흡낭의 위치에 따른 잠수사의 호흡저항을 나타낸 것이다.



그림 19. 호흡낭의 위치에 따른 잠수사의 호흡저항(Barsky et al., 1998)

해군의 구조작전은 다수의 경우가 직립 또는 그와 유사한 자세로 임무를 수행하므로 호흡낭의 앞, 뒤 위치는 그렇게 중요하지 않으며, 폐와 동일한 높이에

장착이 되어 있을 경우, 호흡저항은 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 하지만 구조작전의 특성상 수중 장애물에 의해 호흡량이 파손될 우려가 있으므로 단단한 케이스에 덮혀져 있는 형태의 재호흡기가 적용되어야 할 것이다. 현재 미 해군은 재호흡기로서 MK-16 이라는 모델을 사용하고 있으며 이는 NEDU의 성능평가와 임무 적합도 검사를 마친 수중장비로 미 해군 수상전 센터가 ‘미 해군의 차세대 수중 호흡장비(NUBA, Next-Generation Underwater Breathing Apparatus)’로 발표할 만큼 신뢰성 있는 장비이다(NSWC, 2008). 이 모델은 호흡량이 케이스 내부에 위치하고 있어 파손의 위험이 없으며, 등에 장착 시 폐와 동일한 높이에 위치하고 있어 대부분 직립자세를 유지하는 해난구조작전에서 호흡저항에 문제가 없다. 따라서 우리 해군도 미 해군의 재호흡기와 같은 형태가 도입되면 해난구조작전에 적용 가능할 것으로 판단된다. <그림 20>은 미 해군에서 운용중인 MK-16 재호흡기이다.



MK-16 재호흡기 분해 모습



MK-16 재호흡기
수중운용 모습

그림 20. 미 해군 MK-16 재호흡기

다음으로 재호흡기 운용을 위한 해군의 교육과 관련하여, 재호흡기는 나이트 룩스 잠수와 달리 별개의 새로운 장비로 운용되므로 세부적인 추가 교육이 필요하다. 재호흡기의 구조가 복잡하지는 않지만 대부분 전자장비로 되어 있고 숙달을 위해서는 지속적인 장비 적응과 반복적인 위기상황 대처 훈련이 요구된

다. 그러나 현재 해군 구조부대에는 재호흡기 교육을 수행할 수 있는 인원이 없다. 따라서 먼저 우수 요원을 선발하여 국내·외 민간 재호흡기 교육을 통해 강사 자격을 부여한 다음, 그 인원으로 부대 내 교육을 진행해야 한다. 재호흡기는 혼합기체와 산소분압, 이산화탄소 제거 매커니즘 등 나이트록스에 비해 심화된 생리학적 지식이 요구되며, 폐쇄회로라는 장비의 특성상 개방회로 잠수에 비해 숙달된 구조요원을 대상으로 교육을 수행해야 할 것이다. 해군 해난구조 중급반에서는 헬리옥스 혼합기체 잠수와 이와 관련한 심화된 신체 생리학을 교육한다. 이러한 과정은 재호흡기 운용에 기반이 되는 교육이므로 재호흡기 교육은 중급반에 추가 편성하여 실시하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 중급반 교육을 받는 중사 계급은 실제 해난구조작전에서 다수의 경험이 있는 요원들이므로 폐쇄회로 잠수 장비 운용에 있어서 안전성을 확보할 수 있다.

기술한 바와 같이 나이트록스와 재호흡기를 해난구조작전에 적용 시 개방회로 공기 스쿠버의 단점인 짧은 수중체류시간 및 감압의 비효율성을 극복할 수 있다. 또한, 강조류 및 강풍으로 인한 구조함 함위 유지의 어려움으로 표면공급 잠수체계를 운용하기 곤란한 상황에서도 최초 탐색을 위해 재호흡기 등의 경량 심해잠수체계를 이용하여 신속하고 원활한 작전 수행이 가능하다. 이는 기존의 체계를 전면 부정하고 테크니컬 잠수체계만을 운용해야 한다는 것이 아니라, 복잡 다양한 해난구조 현장의 여건을 고려하여 기존 잠수체계에 추가하여, 심해잠수 작전 효율성 제고를 위한 선택의 폭을 넓혀야 한다는 것이다. <그림 21>은 테크니컬 잠수체계를 구조작전에 도입 시 중대 가능한 효율성을 도식화 것이다.

기 존	테크니컬 잠수체계 도입 시
0 ft	개방회로 공기 스쿠버
130 ft	<div> <div>표면공급 공기 잠수</div> <div> + 나이트록스 잠수 </div> </div>
190 ft	<div> <div>표면공급 혼합기체 잠수</div> <div> + 재호흡기 잠수 </div> </div>

- 130 ft 이내 수심에서 무감압 한계 및 체류시간 증대 가능
- 190 ft 이상 수심에서 스쿠버 체계 이용 작전 불가
- 190 ft 이상 수심에서 스쿠버 체계 이용 작전 가능
- 대심도 잠수 시 잠수모함의 함위 유지 필요
- 잠수모함의 함위 유지가 곤란한 상황에서도 신속하고 원활한 대심도 잠수 가능

그림 21. 테크니컬 잠수체계 도입을 통해 증대 가능한 심해잠수 효율성 도식화

2. 소형 플랫폼과 portable 잠수체계 적용

1) 구조함과 소형 플랫폼 간 외력 비교

선박 체적에 따른 외력을 비교하기 위해 현재 해군이 운용중인 구조함(수상함구조함)과 민간 잠수계에서 운용 중인 잠수모함인 소형 플랫폼(바지선)을 비교하였다. 기본적인 수치는 다음 <표 13>과 같다.

표 13. 구조함과 소형 플랫폼(바지선) 관련 수치

구 분	길 이	폭	평균 흘수	건 현	상부구조물
해군 수상함구조함	86.2 m	15.2 m	5.2 m	4.7 m	복잡, 다수
소형 플랫폼 (바지선)	30 m	12 m	1.5 m	1.5 m	간단, 소수

(1) 풍압력 비교

풍압력 산출을 위해서는 각각의 풍압 투영면적이 요구된다. 해군 구조함의 세부 면적은 군사 자료이므로 세부적으로 표시하지 않고 투영면적을 A에서 K까지 11개 구역으로 분할하여 산출하였다. 소형 플랫폼은 6.07×2.08 m의 컨테이너 구조물이 탑재되어 있는 바지선을 가정하여 산출하였다. <그림 22>와 <그림 23>은 해군 구조함과 소형 플랫폼의 풍압 투영면적을 나타낸 것이다.

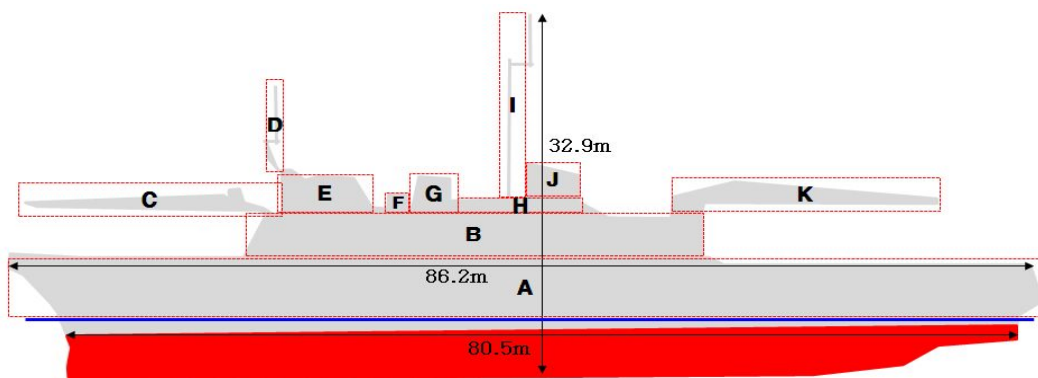


그림 22. 해군 구조함 풍압 투영면적

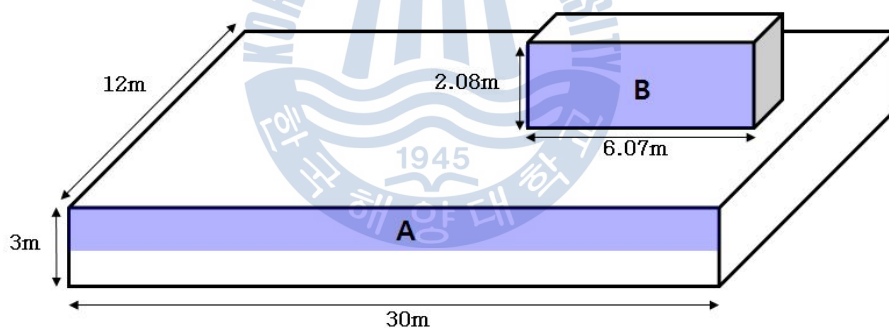


그림 23. 소형 플랫폼 풍압 투영면적

풍압력은 풍속을 10, 20, 30 kts로 구분하여 해군 구조함과 소형 플랫폼이 받는 풍압력을 비교하였다. 풍압력 산출을 위해 구조함과 소형 플랫폼의 상부 구조물 형상에 따라 항력계수를 각기 다르게 설정하였다(Hoerner, 1965). <표 14>부터 <표 16>은 풍속이 10, 20, 30 kts일때 해군 구조함의 풍압력을, <표 17>부터 <표 19>는 소형 플랫폼의 풍압력을 각각 산출한 값이다.

표 14. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 10 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	465.48	4.26	0.9	4,580.57	467.4
B	1.205	207.9	4.95	1.2	3,683.01	375.81
C	1.205	22.8	5.17	1.6	587.47	59.94
D	1.205	4.62	5.57	0.82	70.81	7.22
E	1.205	27.72	5.24	1.0	458.57	46.79
F	1.205	5.33	5.21	1.05	91.52	9.33
G	1.205	13.86	5.24	0.75	171.96	17.54
H	1.205	15.25	5.17	1.05	257.86	26.31
I	1.205	8.3	5.65	0.98	156.44	15.96
J	1.205	21.42	5.35	0.75	277.04	28.26
K	1.205	31.5	5.19	1.6	817.94	83.46
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					11,153.19	1,138.02

표 15. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 20 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	465.48	8.53	0.9	18,365.32	1,874.01
B	1.205	207.9	9.9	1.2	14,732.04	1,503.26
C	1.205	22.8	10.35	1.6	2,354.46	240.25
D	1.205	4.62	11.14	0.82	283.25	28.9
E	1.205	27.72	10.48	1.0	1,834.31	187.17
F	1.205	5.33	10.43	1.05	366.81	37.42
G	1.205	13.86	10.48	0.75	687.86	70.18
H	1.205	15.25	10.35	1.05	1,033.46	105.45
I	1.205	8.3	11.3	0.98	625.77	63.85
J	1.205	21.42	10.7	0.75	1,108.16	113.07
K	1.205	31.5	10.38	1.6	3,271.76	333.85
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					44,663.2	4,557.41

표 16. 해군 구조함의 풍압력 산출 결과(풍속 30 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	465.48	12.80	0.9	41,354.28	4,219.82
B	1.205	207.9	14.85	1.2	33,147.11	3,382.35
C	1.205	22.8	15.54	1.6	5,307.79	541.61
D	1.205	4.62	16.72	0.82	638.09	65.11
E	1.205	27.72	15.72	1.0	4,127.19	421.14
F	1.205	5.33	15.65	1.05	825.85	84.27
G	1.205	13.86	15.72	0.75	1,547.69	157.92
H	1.205	15.25	15.54	1.05	2,329.79	237.73
I	1.205	8.3	16.96	0.98	1,409.65	143.84
J	1.205	21.42	16.05	0.75	2,493.37	254.42
K	1.205	31.5	15.57	1.6	7,361.47	751.17
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					100,542.28	10,259.38

표 17. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 10 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	45	3.55	0.9	307.51	31.37
B	1.205	12.62	4.22	1.2	162.48	16.58
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					469.99	47.95

표 18. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 20 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	45	7.10	0.9	1,230.06	125.51
B	1.205	12.62	8.45	1.2	651.49	66.47
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					1,881.55	191.98

표 19. 소형 플랫폼의 풍압력 산출 결과(풍속 30 kts)

구분	ρ / 밀도 (kgm/m ³)	A_i / 투영면적 (m ²)	u_i / 풍속 (m/s)	C_{di} / 항력계수	풍압력	
					N	kg.f
A	1.205	45	10.65	0.9	2,767.65	282.41
B	1.205	12.62	12.68	1.2	1,467.02	149.69
$\sum_{i=1}^M 1/2 \rho A_i u_i^2 C_{di}$					4,234.67	432.1

기술한 바와 같이 각각 풍압력을 산출한 결과 해군 구조함은 소형 플랫폼에 비해 동일한 풍속에서 약 22.7배 더 큰 풍압력을 받는다. <그림 24>는 해군 구조함과 소형 플랫폼이 받는 풍압력을 비교한 그래프이다.

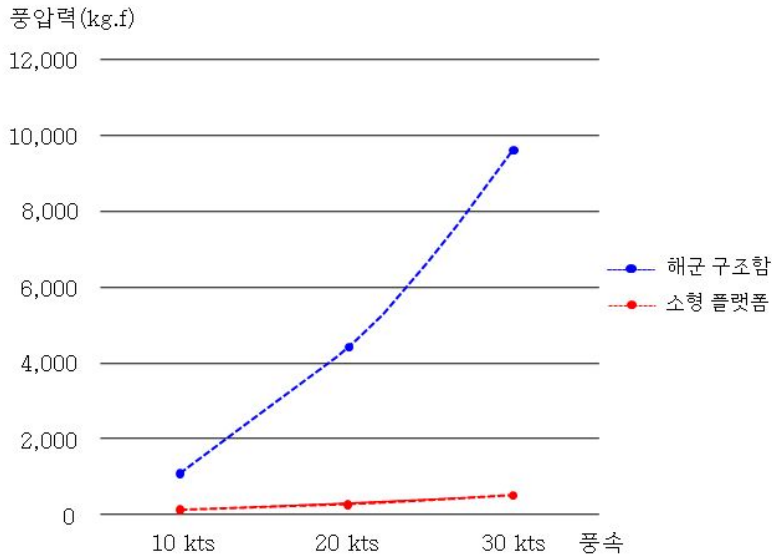


그림 24. 해군 구조함과 소형 플랫폼의 풍압력 비교 그래프

(2) 유압력 비교

유압력은 유속 1, 1.5, 2 kts로 구분하여 해군 구조함과 소형 플랫폼을 비교하였다. 각각의 수중면적은 전장과 평균흘수를 이용하여 추산하였다. 물체에 작용하는 항력은 주로 유체의 점성으로 인하여 물체 표면에 작용하는 마찰항력과 박리로 인해 생기는 압력항력이 복합해서 일어난다. 따라서 항력은 해석적으로 계산하기란 불가능하고 다만 실험에 의존하여 계산한다. 하지만 실제 군사작전을 수행하는 군함에 대한 실험이 불가능하여 기 산출되어 있는 유사한 수면 하 선체에 대한 항력계수를 적용하여 유압력을 산출하였다. 항력계수는 해군 구조함의 경우 수면 하 선체의 형상을 고려하여 반원에 대한 항력계수 값인 0.8을 적용하였고 소형 플랫폼은 투영 면적이 반원보다는 둥근 직사각형에 근접하므로 1.2를 적용하였다(Blevins, 1984). <표 22>와 <표 23>은 유속에 따라 해군 구조함과 소형 플랫폼이 받는 유압력을 산출한 결과이며 <그림 25>는 해군 구조함과 소형 플랫폼의 유압력 비교 그래프이다.

표 20. 유속에 따라 해군 구조함이 받는 유압력

유속 (kts)	해수밀도 (kg.m/m ³)	유속 (m/s)	항력계수 (C _d)	수면 하 면적 (m ²)	유압력	
					N	kg.f
1	1,025	0.51	0.8	418.6	44,639.92	4,555.09
1.5	1,025	0.77	0.8	418.6	101,757.05	10,383.37
2	1,025	1.02	0.8	418.6	178,559.69	18,220.37

표 21. 유속에 따라 소형 플랫폼이 받는 유압력

유속 (kts)	해수밀도 (kg.m/m ³)	유속 (m/s)	항력계수 (C _d)	수면 하 면적 (m ²)	유압력	
					N	kg.f
1	1,025	0.51	1.2	45	7,198.26	734.51
1.5	1,025	0.77	1.2	45	16,408.5	1,674.33
2	1,025	1.02	1.2	45	28,793.07	2938.06

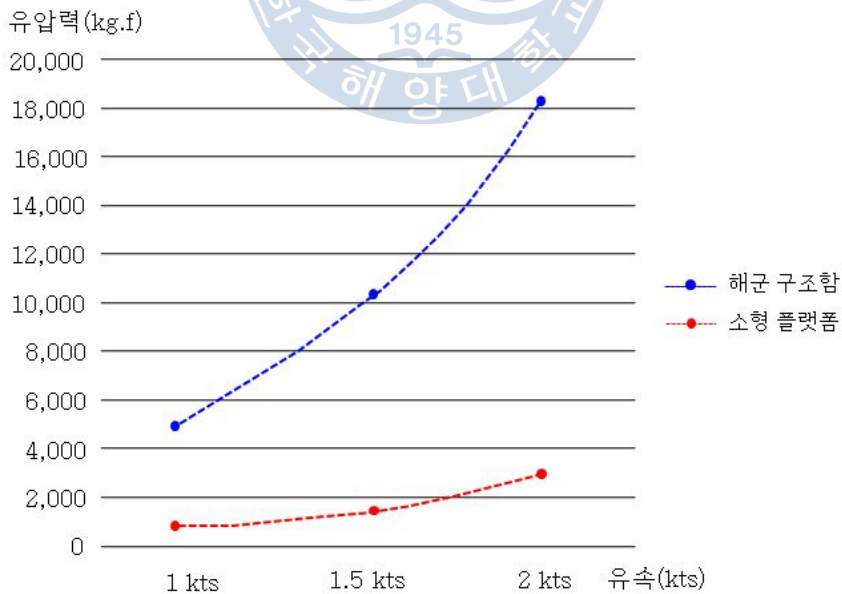


그림 25. 해군 구조함과 소형 플랫폼의 유압력 비교 그래프

상기 결과에서처럼 같은 유속 하에서 해군 구조함은 소형 플랫폼에 비해 6.2배 이상의 유압력을 받는 것으로 분석되었다.

2) 소형 플랫폼과 portable 잠수체계 적용 방안

해군 구조함은 구조작전 시 분명히 유용한 작전 수단이자, 전진기지의 역할을 수행한다. 하지만 높은 외력 허용면적으로 인해 천안함 구조작전 등과 같이 매우 강한 유속, 불량한 기상상태 하에서는 오히려 구조작전의 한계를 더욱 배가시킨다. 원칙상 구조작전은 기상조건이 불량하지 않은 상태에서 진행을 해야 하지만 수중 침몰선체에 인원이 잔류하고 있거나, 최단시간 내 수중 목표물을 회수해야 하는 등의 경우에는 열악한 환경 조건을 극복하고 구조작전을 수행해야 하는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 경우에 해군 구조함은 사고해역의 수중환경 및 기상 상태에 따라, 큰 외력 허용 면적으로 인해 큰 어려움에 직면한다. 따라서 소형 플랫폼과 그에 적합한 portable 잠수 시스템을 적용해야 할 필요성이 제기된다.

먼저, 소형 플랫폼은 민간 잠수계에서 활용중인 소형 바지선을 적용할 수 있다. 소형 바지선은 무동력선으로서 상부 구조물과 체적이 크지 않고 소형이므로 풍압이나 유압을 받는 면적이 적어 열악한 기상 상태에서도 잠수모함 역할을 굳건히 수행해 낼 수 있다. 현재 해군은 구조작전 세력으로 보유하는 바지선이 없다. 그러나 굳이 바지선을 해군 구조부대에서 보유, 관리할 필요는 없다. 동·서·남해에서 발생하는 구조작전 중 열악한 기상 하에서 시급을 다투는 구조작전 상황이 매년 발생하는 것이 아니라, 특이한 경우에만 간헐적으로 발생되기 때문이다. 따라서 평상시 바지선의 불필요한 유지·보수 노력을 기울이는 것은 경제적, 효율적 측면에서 바람직하지 않으며, 민·관 구조자산 활용을 고려하여야 한다. 민·관 구조자산의 효율적인 활용을 위해서는 민·관 구조자산의 정보자료 구축 및 능력조사서 D/B화를 지속적으로 실시하고 구조상황 발생 시 현장 조치 행동 매뉴얼을 보완하며, 민·관 구조자산 통합 활용을 위한 협조체계를 구축해야 한다(정, 2012).

해군에서는 민간 구난업체 능력과 구조자산 등의 정보를 파악하고 지속적으로 업데이트 하고 있다. 현재 해군이 파악 중인 주요 민간 구난업체는 19개소 정도이다. 이 19개 업체는 주로 서해와 남해에 소재지를 두고 있으며 대부분 바지선과 예인선을 보유한 업체이다. 따라서 해군은 구조작전 상황 발생 시 현장 최인근 업체와 바지선 대여 계약을 체결하여 소형 플랫폼을 활용할 수 있다. <표 25>는 해군에서 파악 중인 주요 민간 구조자산 현황이다.

표 22. 해군에서 파악 중인 주요 민간 구조자산 현황(해군본부, 2011)

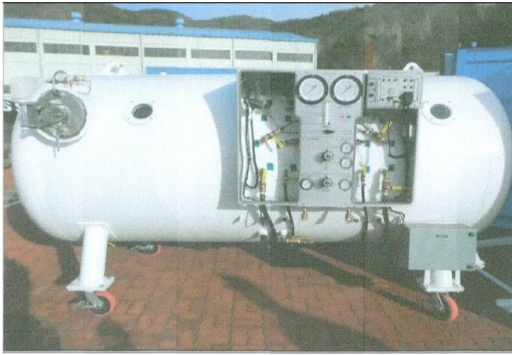
업체명	소재지	보유선박	주요실적(최대)
00 해양개발	울산	○ 예인선: 1척 ○ 작업선: 1척 ○ 바지선: 2척	○ 인양: 3회(50톤급) ○ 이초: 3회(50톤급) ○ 기타: 30여회
00 수중공사	부산	○ 기중기선: 3척 ○ 예인선: 3척	○ 인양: 7회(1,600톤급) ○ 이초: 16회(5,500톤급) ○ 기타: 5회
00 살배지	부산	○ 기중기선: 1척 ○ 예인선 2척 ○ 작업선 2척 ○ 바지선 1척	○ 인양: 8회(3,000톤급) ○ 이초: 11회(6,500톤급) ○ 기타: 5회
000 잠수	부산	○ 기중기선: 2척 ○ 예인선: 1척	○ 인양: 8회(3,000톤급) ○ 이초: 11회(6,500톤급) ○ 기타: 10회
00 수중개발	부산	○ 기중기선: 2척 ○ 예인선: 2척 ○ 작업선: 2척 ○ 바지선: 1척	○ 인양: 25회(100,000톤급) ○ 이초: 20회(100,000톤급) ○ 기타: 10회 * 천안함 구조작전 참가
00건설	부산	○ 기중기선: 2척 ○ 예인선: 2척 ○ 바지선: 2척	○ 인양: 10회(2,000톤급) ○ 이초: 5회(5,000톤급) ○ 기타: 10여회

업체명	소재지	보유선박	주요실적(최대)
00 I&D	부산	○ 기중기선: 4척 ○ 예인선: 7척 ○ 바지선: 6척	○ 인양: 3회(500톤급) ○ 이초: 2회(1,500톤급) * 천안함 구조작전 참가
00해양	부산	○ 기중기선: 4척 ○ 바지선: 1척	○ 인양: 27회(27,000톤급) ○ 이초: 33회(25,000톤급)
000 살배지	부산	○ 기중기선: 2척 ○ 작업선: 2척 ○ 준설선: 1척	○ 인양: 5회(5,000톤급) ○ 이초: 10회(20,000톤급)
00 해양개발	부산	○ 기중기선: 3척	○ 인양: 3회(2,000톤급) ○ 기타: 5회
00 해양개발	부산	-	○ 인양: 10회(1,000톤급)
00 수중개발	부산	-	○ 인양: 2회(200톤급)
00 조선해양	통영	○ 기중기선: 1척 ○ 예인선: 2척 ○ 작업선: 2척 ○ 바지선: 1척	○ 천안함 구조작전 참가
해양환경 관리공단	인천	○ 기중기선: 1척 ○ 예인선: 1척	○ 인양: 2회(2,000톤급) ○ 이초: 2회(500톤급)
00 살배지	인천	○ 기중기선: 1척 ○ 예인선: 1척 ○ 작업선: 1척 ○ 바지선: 1척	○ 인양: 2회(300톤급) ○ 이초: 2회(280톤급)
00잠수 기술공사	인천	○ 작업선: 4척	○ 인양: 20회(2,600톤급) ○ 이초: 21회(2,400톤급)
00 개발공사	인천	○ 작업선: 4척	○ 인양: 20회(1,500톤급) ○ 이초: 19회(1,300톤급) * 천안함 구조작전 참가
00 선박해체	인천	○ 작업선: 4척 ○ 바지선: 5척	○ 인양: 8회(3,000톤급) ○ 이초: 8회(600톤급)
000 수중개발	인천	-	○ 인양: 2 (200톤급)

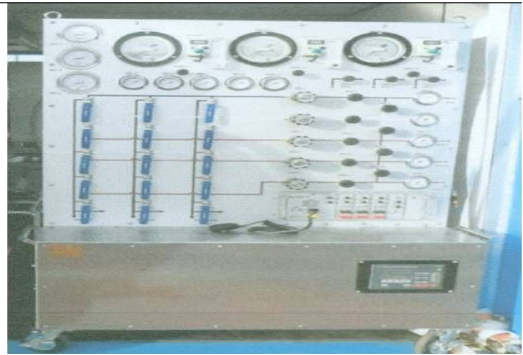
한 수로개척 등 주로 항내에서 발생하는 구조 활동 소요를 충족시키기 위한 행위로써, 주로 항만(육상)에 장비를 배치한 후 잠수, 구조 활동을 수행한다. 소요가 있는 항만까지 트레일러로 MDS를 이송 후 하역하여 운용하는데, 이러한 개념을 적용하여 소형 플랫폼이 요구되는 구조작전 상황 발생 시 MDS를 트레일러에 적재하여 민간 소형 플랫폼이 위치하는 항구로 육상 이송할 수 있다. 컨테이너에 적재되어 있으므로 크레인을 이용하여 손쉽게 바지선에 탑재 가능하다.

MDS를 구성하는 컨테이너에는 3인용 챔버, 잠수 조종 콘솔, 고압 공기 압축기, 호흡기체 실린더, 기체 부스터 펌프, volume tank 등이 적재되어 있다. 챔버는 운영 압력 7.5 bar, 설계 압력 8.5 bar, 시험 압력 11.05 bar로 구성되어 있으며 챔버 내부 BIBS(Built-in Breathing System) 마스크는 내부 3, 외부 1개가 장착되어 있다. 잠수 조종 콘솔은 3명의 잠수사 지원이 가능하며 최대 100 m 까지 잠수 조종 지원이 가능하여 MDS를 통해 100 m 수심까지의 표면공급 잠수가 가능하다. 엠빌리컬은 총 3개를 보유하고 있으며 길이는 600 ft 이다. 호흡기체 실린더는 공기와 헬리옥스로 구분하여 운용하며, 공기는 2개의 बैं크로 구성되어 각 8개씩 16개의 실린더를 운용중이며, 헬리옥스는 2개의 산소 बैं크(54개 실린더)와 3개의 해저기체 बैं크(70개 실린더), 2개의 감압기체 बैं크(26개 실린더)로 구성되어 있다. MDS 보유 기체는 3명의 잠수사가 300 ft에서 20분 간 16회 이상 잠수 가능한 기체 양이다(해군 5전단, 2011).

이러한 장비들을 구성하는 컨테이너는 총 2개로 분류되는데, 한 개의 컨테이너에는 챔버와 잠수 조종 콘솔, 엠빌리컬이 적재되어 있고 또 다른 한 개의 컨테이너에는 고압 공기 압축기, 호흡기체 실린더, 기체 부스터 펌프, volume tank 등이 적재되어 있다. 장비 적재 시 컨테이너의 무게는 각각 5.8톤과 18톤이다. MDS의 주요 구성품과 제원은 <그림 27> 및 <표 25>와 같다.



챔 버



잠수 조종 콘솔



호흡기제 실린더



고압 공기 압축기

그림 27. MDS 주요 구성품(해군 5전단, 2011)

표 23. MDS 제원(해군 5전단, 2011)

구 분		내 용
챔버 컨테이너	기본제원	높이: 2.48 m, 전폭: 2.43 m, 전장: 6.07 m, 총 중량: 5.8톤
	챔버	운용압력: 7.5 bar, 설계압력: 8.5 bar, 시험압력: 11.5 bar 중량: 2ton, BIBS 마스크: 내부 3, 외부 1개 배치 내부격실 체적: 3.8 m ³ , 외부격실 체적: 2.1 m ³
	잠수 조종콘솔	최대 잠수 수심: 100 m(330 ft) 최대 매니폴드 공급압력: 220 bar 최저 매니폴드 공급압력: 25 bar 고압 시험압력: 300 bar, 저압 시험압력: 39 bar
	엄벌리컬	3개 배치(길이: 600 ft)
	산소분석기	각 잠수 매니폴드 당 1개
	통화장치	잠수 헬멧 당 1개

구 분		내 용
호흡기체 뱅크 컨테이너	기본제원	높이 2.58 m, 전폭 2.43 m, 전장 6.07 m, 총 중량 : 18톤 호흡기체 실린더 체적: 1.765 cf
	호흡기체 뱅크 (HeO ₂)	○ 산소 뱅크 No.1 뱅크: 27개(실린더)/5,951 scf No.2 뱅크: 27개(실린더)/5,951 scf
		○ 헬리옥스(HeO ₂) 해저기체 뱅크 No.1 뱅크: 32개(실린더)/7,503 scf No.2 뱅크: 32개(실린더)/7,503 scf No.3 뱅크: 6개(실린더)/1,322 scf
		○ 헬리옥스(HeO ₂) 감압기체(50/50) 뱅크 No.1 뱅크: 13개(실린더)/2,865 scf No.2 뱅크: 13개(실린더)/2,865 scf
	호흡기체 뱅크 (공기)	No.1 뱅크: 8개(실린더)/2,644 scf No.2 뱅크: 8개(실린더)/2,644 scf
	고압공기 압축기	압축기체: 공기, 분당 토출량: 600 l /min 운용압력: 최대 350 bar
	부스터 펌프	저압 공기 구동식(최대 8 bar)

미 해군의 기동 구조부대인 MDSU(Mobile Diving Salvage Unit)는 “전 세계로의 잠수(We dive the world over)”라는 구호 아래 어떠한 환경에서도 항만 개항, 구조, 수중탐색 및 인양 그리고 수중 긴급복구를 수행하기 위하여 전투준비, 원정작전, 신속한 전개가 가능한 기동 잠수 및 구조 파견 임무를 수행하는 부대이다(USN, 2012). MDSU의 구조작전 개념은 항공기를 이용하여 잠수시스템을 이동시키고, 구조작전 현장 최 인근 지역의 잠수모함에 탑재하여 임무를 수행하는 것이다. 해군 구조작전에 소형 플랫폼과 MDS를 적용하는 것 역시 이러한 맥락 중의 하나로 볼 수 있으며, 해군 구조함의 잠수 관련 체계만을 해상에서 활용하는 것과 같은 개념이다. 소형 플랫폼은 구조함의 잠수모함 역할을 수행하되, 여타 좌초선 이초, 예인, 소화방수 등 기타 해난구조 임무를 배제한 순수한 잠수모함으로서의 역할을 한다. 그리고 MDS는 구조함의 잠수체계 역할

을 수행할 수 있다.

소형 플랫폼과 MDS 조합을 위해서는 해군 구조작전 절차가 변화되어야 한다. 구조작전 상황이 발생하면 당 해역 상황(조류) 및 기상상태(풍속)등을 고려하여 구조함을 투입할 것인지, 소형 플랫폼을 활용할 것인지를 결정해야 한다. 소형 플랫폼 활용을 결심하였다면 해군본부 차원에서 구조작전 해역 최 인근 적합 플랫폼을 판단, 계약을 체결하고 해난구조 요원 및 MDS는 육로 또는 항공기를 이용하여 소형 플랫폼이 위치하는 항구로 최단시간 내 이동하여, 소형 플랫폼에 MDS를 탑재한다. 그리고 작전해역으로 이동 후 구조작전을 수행한다. <그림 28>은 기존 구조작전 절차와 소형 플랫폼 적용 시 변화 되어야 할 구조작전 절차(안) 이다.

기존 구조작전 절차		소형 플랫폼 적용 시 구조작전 절차(안)	
① 구조상황 발생		① 구조상황 발생	
② 당 해역 상황 및 기상 판단		② 당 해역 상황 및 기상 판단	
③ 구조함 전개		③ 플랫폼 결정	
④ 적합 잠수체계 결정 (표면공급 또는 스쿠버)		③-A 구조함 적합 잠수체계 결정	③-B 소형 플랫폼 적합 자산 판단 및 요청 소형 플랫폼 계약(해본) 구조요원 및 MDS 육상 또는 항공 이동 MDS 탑재 후 작전해역 이동

그림 28. 소형 플랫폼 적용 시 변화되어야 할 구조작전 절차(안)

V. 결론 및 논의

해군 해난구조작전의 효율성 향상을 위해 테크니컬 잠수와 개방회로 공기 스쿠버 간 가용심도, 무감압 한계시간, 감압 및 호흡기체 운용의 효율성 등을 비교·분석하고, 동일한 환경 조건 하에서 해군 구조함과 소형 플랫폼에 미치는 외력을 산출, 비교하여 개선사항을 도출한 결과는 다음과 같다.

먼저, 개방회로 공기 스쿠버의 제한사항을 극복하기 위해서는 테크니컬 잠수 체계 도입이 필요하다. 테크니컬 잠수는 나이트록스 잠수와 재호흡기로 분류하여 도입방안을 제시할 수 있다.

나이트록스 잠수는 첫째, 장비 도입측면에서 개방회로 공기 스쿠버에 비해 별도의 특별한 장비가 필요 없으므로 빠른 시일 내에 개방회로 공기 스쿠버를 대체하여야 한다. 나이트록스 잠수체계는 130 ft 이내의 수심에서 운용할 시 무감압 하 수중체류 가능시간 극대화가 가능하여 감압 효율성 증대는 물론 그 만큼의 수중작업 연속성 보장이 가능하다. 둘째, 도입을 위한 교육측면에서 별도의 추가 교육 없이 현재 해난구조 초급반의 교육과정을 일부 개정하여 나이트록스 잠수 교육이 가능하다. 또한, 기 수료자의 경우는 단기간의 실무교육을 통해 보완이 가능할 것이다.

재호흡기는 첫째, 장비 도입측면에서 고정 산소분압 1.3 ata 헬륨 희석 재호흡기 도입이 필요하며 그 형태는 미 해군의 MK-16 계열이 구조작전에 적합하다. 이러한 재호흡기 적용을 통해 수심에 관계없이 장시간 수중 체류가 가능하며 감압의 효율성을 증대시켜 구조작전 효율성을 향상 시킬 수 있다. 둘째, 재호흡기를 구조작전에 도입함에 있어 이산화탄소 제거와 관련된 위험성으로 인해 중작업용이 아닌 경작업 및 심해 탐색용으로 활용하여야 할 것이다. 셋째, 재호흡기 체계 도입을 위한 교육측면에서 강사요원 선 배출 후 그 인원을 교관으로 활용, 해난구조 중급반 교육과정을 개정하여 재호흡기 교육을 수행하여야 한다.

다음, 함위 유지의 안정성 확보를 위해서는 소형 플랫폼의 구조작전 적용이 필요하다. 소형 플랫폼은 해군 구조함에 비해 풍압력 22.7배, 유압력 6.2배 이상의 함위 유지 안정성 확보가 가능하므로, 조류 및 풍속 등이 악조건일 경우 소형 플랫폼 적용을 고려할 필요가 있다. 이를 위해 첫째, 민·관 구조자산의 정보자료 구축 D/B화를 지속적으로 실시하고 민·관 구조자산 통합 활용을 위한 협조체계 강화를 통해 필요 시 소형 플랫폼을 구조작전에 활용할 수 있는 여건을 조성해야 한다. 둘째, 소형 플랫폼에 탑재할 잠수체계로서 현재 해군이 전투구조용으로 운용 중인 MDS를 적용하여야 한다. MDS는 육상 이송이 가능하므로 빠른 전개는 물론, 모듈화된 잠수 시스템 구비로 구조작전의 연속성 및 안전성 확보가 가능하다.

이와 같이 해군이 테크니컬 잠수체계와 소형 플랫폼을 적용하여 상황에 맞게 적절히 활용한다면 개방회로 공기 잠수와 대형 잠수모함의 제한사항 극복이 가능하며, 전반적으로 해난구조 활동 효율성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- 강신영 (2010). 수중 작업에 있어서 극한 환경의 잠수 활동 기준 검토. 한국 마린엔지니어링학회지, 34(5), 738-741.
- 강신영 (2000). 유체역학 이론에 근거한 조난물체의 위치 추정 모델. 한국 항만학회지, 14(3).
- 김동주 (2005). 한국 해군 해난구조 발전방향. 석사학위 논문, 해군사관학교 군사과학대학원.
- 김의용 (2005). 잠수 생리학. 생리학 수업교재, 인제대학교 의과대학.
- 이윤석, 정창현, 공길영, 배병덕 (2009). 실선 계측에 의한 주요패턴 분석에 관한 연구. 한국항해항만학회 발표 논문집, 33(8), 505-511.
- 정창현, 공길형 (2009). 실선계측을 통한 표박중인 선박의 풍압력 적용에 관한 연구. 해양 안전환경학회지, 15(3), 223-228.
- 정창호 (2004). 잠수사고 사례 고찰을 통한 안전대책에 관한 연구. 석사학위논문. 한국해양대학교, 25-26.
- 정주성 (2012). 해난구조 능력 분석과 실 사례 분석을 통한 구조효율성 향상에 관한 연구. 석사학위논문. 한국해양대학교, 75.
- 하재현, 김양수, 권혁칠 (2002). 유체역학. 문운당, 313-314.
- 해군, 해군본부 (2010). 구조작전. 국군인쇄창.
- 해군 (2011). 민·관 수색구조자산 현황. 자체보고서, 해군본부.
- 해군, 작전사령부 (2005). 폐쇄/반폐쇄식 잠수지침서. 국군인쇄창.
- 해군, 작전사령부 (2001). 잠수함구조함 운용지침서. 국군인쇄창.
- 해군 (2011). MDS 운용지침서. 자체보고서, 5전단.
- 해군 (2010). 구조작전 지휘참고철. 자체보고서, 5전단.
- 해양경찰청 (2011). 수색구조 역량 강화 방안. 자체보고서, 경비안전국.
- Baker, E.C. (1995). Understanding M-value. USA.
- Barsky S.M., Thurlow, Mark. and Ward, M. (1998). The simple guide to rebreather diving. BPM, Arizona, 25-61.
- Blevins, R.D. (1984). Applied fluid dynamic handbook. VNR, New York,

310-311.

Clark, J.R., Lenfant B. and Claude K. (1999). Underwater Breathing Apparatus, The lung at Depth. Dekker Inc, New York, 429-528.

Haldane, J.S., Boycott, A.E. and Damant, G.C.C. (1907). The Prevention of Compressed Air illness. Vol 8, Journal of Hygiene.

Hoerner, Sigward F. (1965). Fluid-Dynamic Drag. Oklahoma City, 3-12.

Johnson, T.M. and Gerth. W.A. (2002). 1.3 PO₂-in-He Decompression table for MK-16 Mod 1 diving. Technical report, USN NEDU, Florida.

Juergensen, K. (2011). CCR-1600 operation manual. Juergensen defense corp, USA, 13-14.

Mekjavic, I.B., Savic, S.A. and Eiken, O. (1995). Nitrogen narcosis attenuates shivering thermogenesis. Journal of Applied Physiology, 78:2242-2244.

Mount, T. (1998). Technical Diver ENCYCLOPEDIA. IANTD, USA, 105-106.

Mount, T., Sawatzky, D. and Hess, J. (2010). Tek Closed Circuit Rebreather. IANTD, USA, 51-62.

NOAA. (2002). NOAA Diving Manual. BPC, USA, 15-14.

Powell, M. (2010). Deco for divers. Aqua Press, UK, 39-42.

USN. (2008). US Navy Diving manual. NAVSEA, Florida.

USN. (2001). Technical manual no. 01-94. NEDU, USA.

Wells, J.M. and Phoel, W.C. (1995). Recent developments in the preparation of mixed gas breathing media, Nitrox Heliox, and Trimix. Diving Physiology, Miura.

Wienke, B.R. (2003). Basic decompression theory and application. BPC, USA.

Williamson, A.M., Clarke, B. and Edmonds, C. (1987). Neurobehavioural effects of professional abalone diving. Br. J. Ind, USA.

Workman, R.D. (1965). Research report 6-65 calculation for nitrox-oxygen and helium-oxygen dives. USN NEDU, Washington.

참고 웹사이트

국립해양조사원 (2012). <http://www.khoa.go.kr>

IANTD (2012). <http://www.iantd.co.kr>

PADI (2012). <http://www.padi.com>

U.S. Navy (2012). <http://www.navy.mil>

U.S. Navy Mobile Diving & Salvage Unit (2012). <http://www.mdsu2.navy.mil>

U.S. Naval Surface Warfare Center (2008). <http://www.mdsu2.navy.mil>

